



# Návrh pohonného systému SMS Somet Berox.

## Diplomová práce

*Studijní program:* N2301 – Strojní inženýrství  
*Studijní obor:* 2301T049 – Výrobní systémy a procesy  
*Autor práce:* **Bc. Ondřej Hadač**  
*Vedoucí práce:* Ing. Petr Keller, Ph.D.



## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Ondřej Hadač**  
Osobní číslo: **S15000321**  
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Výrobní systémy a procesy**  
Název tématu: **Návrh pohonného systému SMS Somet Berox.**  
Zadávací katedra: **Katedra výrobních systémů a automatizace**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Cílem diplomové práce je vypracování podkladů pro přestavbu stávajícího ručního ovládání souřadnicového měřicího stroje Somet Berox XYZ 464 na automatické (popř. poloautomatické) ovládání pomocí počítače. Tato přestavba by měla proběhnout s minimálními zásahy do stávající konstrukce stroje.

1. Seznamte se se souřadnicovým měřicím strojem Somet Berox XYZ 464 a proveďte analýzu možností zautomatizovat posuvy stroje ve všech třech posuvových osách.
2. Proveďte rozbor možných pohonů pro posuvové osy. Dále proveďte analýzu a vyberte nejvhodnější způsob pohonu s ohledem na stávající konstrukci stroje s ohledem na ekonomiku návrhu.
3. S ohledem na vybraný typ pohonů vytvořte 3D návrh konstrukce držáků pohonů do stávajícího uspořádání SMS s ohledem na co nejmenší zásah do původní konstrukce stroje.
4. Analyzujte možnosti a požadavky na řízení navržených pohonů ideálně v kombinaci s měřicím softwarem stroje a řízení realizujte.
5. proveďte zhodnocení práce.

Rozsah grafických prací: **Dle potřeby**  
Rozsah pracovní zprávy: **cca 55 stran**  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**  
Seznam odborné literatury:

[1] **POKORNÝ, P. Souřadnicové měřicí stroje. Liberec: TU v Liberci, 1999.**

[2] **SOMET. Dokumentace souřadnicového měřicího stroje Somet Berox - návod k obsluze XYZ 464. Somet [1990]**

[3] **TOPMES s.r.o. Tango!3D: Referenční příručka verze číslo 3.0. Praha: Topmes s.r.o., 2010.**

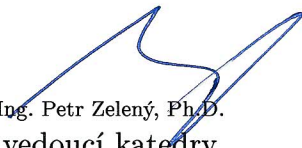
Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Keller, Ph.D.**  
Katedra výrobních systémů a automatizace

Datum zadání diplomové práce: **1. listopadu 2016**

Termín odevzdání diplomové práce: **1. února 2018**

  
prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld  
děkan



  
Ing. Petr Zelený, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Liberci dne 1. listopadu 2016

## Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum: 23.5.2017

Podpis:



Tímto bych rád poděkoval panu Ing. Jiřímu Miletínovi za poskytnutí odborných rad a výkresových dokumentací k SMS Somet Berox, firmě Svárovský MB za pomoc s výrobou důležitých součástí, panu Ing. Radku Votrubcovi, Ph.D. za cenné rady v oblasti programování řízení SMS v platformě Arduino a vedoucímu práce panu Ing. Petru Kellerovi, Ph.D. za vedení diplomové práce.

Závěrem patří velké díky mé rodině, která mi byla velkou oporou při celém studiu na FS TUL.

## **Anotace**

Tato diplomová práce se zabývá návrhem pohonného systému souřadnicového měřicího stroje Somet Berox XYZ 464B, který se nachází v laboratoři Katedry výrobních systémů a automatizace TUL. Teoretická část pojednává o historii souřadnicových měřicích strojů a rozebírá stávající konstrukci SMS Somet Berox XYZ 464B. Cílem praktické části je nalezení několika vhodných variant pro pohon a řízení SMS Somet Berox XYZ 464B, výběr vhodnější varianty dle vytvořených vyhodnocovacích kritérií a její praktické zrealizování, včetně testování stroje.

## **Klíčová slova**

Souřadnicový měřicí stroj, SMS, Somet Berox XYZ 464B, návrh pohonu, Arduino, metrologie

## **Annotation**

This Master thesis deals with the design of CMM Somet Berox XYZ 464B propulsion system that is to be found in the laboratory of Department of manufacturing systems and automation, Technical university of Liberec. The theoretical part focuses on the history of coordinate measuring machines and analyses the current construction of CMM Somet Berox XYZ 464B. Finding of several applicable varieties to propulse and control CMM Somet Berox XYZ 464B, a choice of the most suitable variety according to stated assessment criteria and a subsequent practical implementation of the most suitable solution are the goals of the practical part.

## **Keywords**

Coordinate measuring machine, CMM, Somet Berox XYZ 464B, propulsion design, Arduino, metrology

Zpracovatel: TU v Liberci, Fakulta strojní, Katedra výrobních systémů a automatizace

Počet stran: 80

Počet příloh: 11

Počet obrázků: 31

Počet tabulek: 5

# Obsah

1	Úvod .....	10
1.1	Cíl práce .....	10
2	Historie SMS .....	11
2.1	První SMS ve světě .....	11
2.2	Počátek konstrukce stroje Somet Berox .....	12
3	Stávající konstrukce SMS Berox .....	13
3.1	Hlavní části SMS Somet Berox XYZ 646B .....	13
3.1.1	Podstava .....	15
3.1.2	Granitová deska .....	15
3.1.3	Mostová konstrukce .....	15
3.1.4	Osy XYZ .....	16
3.1.5	Mikroposuvy jednotlivých os .....	16
3.2	Pinola s dotykovou sondou .....	18
3.3	Odměřovací zařízení .....	19
3.4	PC s vyhodnocovacím softwarem Tango!3D .....	20
4	Současné trendy SMS .....	21
4.1	Lineární synchronní elektromotory .....	22
4.2	Odměřovací pravítka .....	23
4.3	Využívání vhodnějších materiálů pro konstrukci stroje .....	24
5	Návrh řešení – varianta A .....	26
5.1	Mechanické komponenty potřebné k realizaci .....	28
5.1.1	Konstrukce držáků motorů .....	28
5.1.2	Návrh převodů .....	30
5.2	Krokové motory Microcon SX17-1005LQCEF .....	36
5.3	Bezpečnostní indukční snímače polohy .....	37
5.4	Řídící komponenty Arduino .....	38
5.4.1	Arduino AtMega 2560 .....	39
5.4.2	3D CNC Shield V3 Printer Expansion Board .....	40
5.4.3	Arduino motor driver DRV8825 .....	41
5.4.4	Joystick PS2 .....	42

5.5	Studie designu krytu ovladače .....	43
6	Návrh řešení - varianta B.....	45
6.1	Pantec Eagle basic .....	46
6.2	Renishaw UCC S3 kontroler.....	46
6.3	Deva CMM System pack solution .....	47
7	Porovnání variant.....	48
7.1	Soupis požadavků na pohon pro SMS .....	48
7.2	Vícekriteriální rozhodování .....	49
8	Realizace varianty A.....	51
8.1	Tvorba 3D modelů – konstrukční práce .....	52
8.2	Nákup komponentů.....	54
8.3	Demontáž nepotřebných komponentů .....	55
8.4	Softwarové propojení.....	55
8.4.1	Testování joysticku pro osy XYZ .....	55
8.4.2	Kódy pro řízení krokových motorů.....	57
8.5	Přípravné práce a výroba .....	58
8.6	Montážní práce .....	60
8.7	Kalibrace .....	62
9	Kontrola funkčnosti a přesnosti stroje .....	63
9.1	Podmínky pro úplné uvedení do provozu .....	63
	Závěr .....	64
	Seznam literatury: .....	66
	Seznam příloh .....	68



# Seznam použitých zkratek

CAD	Computer Aided Design
CNC	Computer Numeric Control
DC	Direct Current
DFA	Design For Assembly
DFM	Design For Manufacturability
DXF	Drawing Exchange Format
IDE	Arduino Software
MS	měřicí stroj
PS	Playstation
PU	Polyuretan
PWM	Pulse Width Modulation
SMS	souřadnicový měřicí stroj
Software	programové vybavení
STEP	Standard for Exchange of Product model data
TIG	Tungsten Inert Gas
3D	trojrozměrný

# Seznam veličin a jejich jednotky

$\omega$	úhlová rychlost	$[\text{rad.s}^{-1}]$
$D_w$	výpočtový průměr řemenice	$[\text{m}]$
$z$	počet zubů řemenice	$[-]$
$\beta$	doplňkový úhel	$[\text{rad}]$
$a$	osová vzdálenost řemenic	$[\text{m}]$

# 1 Úvod

V dnešní době, kdy jsou kladeny stále větší nároky na kvalitu, přesnost a jakost vyráběných dílů, je velice důležité neustálé zlepšování, zkvalitňování a zrychlování měřicích strojů a zařízení. Mezi tyto zařízení patří zejména souřadnicové měřicí stroje označované zkráceně SMS.

SMS slouží pro měření rozměrů a geometrických tolerancí. Ve spolupráci s vhodně zvoleným vyhodnocovacím softwarem dokážou naměřené hodnoty vyhodnocovat a porovnávat s nominály, ale také vytvářet zpětně 3D modely. SMS jsou schopné omezit až odstranit chyby vzniklé lidským faktorem, který hraje nemalou roli ve výsledcích daných měření.

Diplomová práce v teoretické části pojednává o historii SMS, zejména o vzniku stroje Somet Berox XYZ 464B a jeho konstrukci. Dále jsou v teoretické části rozebrány současné trendy využívané ve vrcholných řadách SMS.

## 1.1 Cíl práce

Ve fázi praktické si diplomová práce klade za cíl vytvoření několika komplexních návrhů pohonného systému konkrétního ručního souřadnicového měřicího stroje Somet Berox XYZ 464B nacházejícího se na Katedře výrobních systémů a automatizace Technické univerzity v Liberci. Výsledkem práce je výběr nejvhodnějšího řešení a následná přestavba na SMS poháněný za pomoci elektrických motorů ovládaných joystickem. Tento stroj je možné v současnosti ovládat pouze ručním posuvem os XYZ, což s sebou nese určitou míru chybovosti vzniklou lidským faktorem. Z tohoto důvodu bude nutné stroj přestavět a za pomoci co nejšetnějších zásahů do jeho konstrukce přebudovat na motorizovaný souřadnicový měřicí stroj. Tato přestavba musí být realizována tak, aby nedošlo k porušení tuhosti stroje, což by mohlo vést k následným nepřesnostem při měření, a tím by se stal stroj nepoužitelným. Přestavěný stroj je nutné v samém závěru testovat v provozu a naměřené hodnoty na něm dále porovnat s hodnotami nominálu.

## 2 Historie SMS

### 2.1 První SMS ve světě

První stroj, který lze nazývat souřadnicovým měřicím strojem, byl vynalezen okolo roku 1956 Skotskou společností Ferranti, Ltd. Tato společnost odpovíděla na zvětšující se poptávku po rychlejších a pružnějších měřicích strojích, která souvisela se stále více se rozvíjející automatizací. Nutno podotknout, že stroj byl pohyblivý pouze ve 2 osách, osa Z byla přidána až po roce 1960. Okolo roku 1970 probíhal vývoj na motorizaci všech os, což vedlo k dramatickému zpřesnění strojů, jelikož se již obsluha stroje nemusela složitě natahovat a ručně osy ovládat, ale stačilo použít připojené dálkové ovládání.

Dalším milníkem, souvisejícím se zpřesněním strojů, bylo vynalezení dotekové sondy, jejímž strůjcem je sir David Mcmurtry - zakladatel firmy Renishaw. Výrobou měřicích strojů se po úspěších prvního prototypu SMS značky Ferranti začaly zabývat další věhlasné společnosti jako např. Carl Zeiss a Mitutoyo. Díky tomu docházelo ke stále většímu zpřesňování a zkvalitňování strojů. Výsledky jejich snažení můžeme vidět na strojích dnešní doby. [1]

## 2.2 Počátek konstrukce stroje Somet Berox

V tehdejší Československu, kdy byly na dlouhé desítky let prakticky uzavřeny hranice do západního světa, bylo takřka nemožné, dostat se k nějakým kvalitnějším SMS, které se ve světě již běžně používaly. Z tohoto důvodu bylo nutné takový stroj zkonstruovat v podstatě od počátku. Tohoto úkolu se zhostila v 80. letech minulého století tehdejší TST k.p. Somet Teplice. SMS XYZ 464 B navazuje na stroj XYZ 643, jenž byl konstruován v rámci vývoje měřidel ve firmě Somet. Po ukončení vývoje došlo v roce 1984 k zahájení opakované výroby MS XYZ 643. Jednalo se o první opakovaně vyráběný MS v rámci celého východního bloku. Výroba MS XYZ 643 se dostala směrem na východ až do Japonska. Během konstrukce stroje bylo využito 10 nových vynálezů a průmyslových vzorů, na kterých byl z 80% spoluautorem Jiří Miletín starší. Jak již bylo řečeno, konstrukce stroje probíhala od počátku a nejednalo se tedy o žádnou kopii již vyráběného stroje.

SMS XYZ 643 se svými mechanickými vlastnostmi mohl velmi úspěšně vyrovnat zahraniční konkurenci, avšak značně u něho zaostávala výpočetní technika. V tomto ohledu byly nejprve provedeny kroky v rámci východního bloku, kdy po kooperaci s Carl Zeiss v Jeně došlo k hledání společného řešení. Tyto kroky bohužel nepřinesly žádné uspokojivé výsledky. Díky tomu bylo rozhodnuto o navázání spolupráce s některou renovovanou západní firmou.

Jednalo se bohužel o to, že východním partnerům byly logicky poskytovány druhořadé technologie. Avšak tyto technologie představovaly pro firmy z východního bloku poměrně pokrokové řešení. Po vyhodnocení nabídek na spolupráci od západních vyspělejších firem, byly v roce 1988 uskutečněny testy společné varianty SMS XYZ 643 s výpočetní technikou firmy Berox Machine Tool Company Ltd. z Velké Británie. Měřicí stroje řady Merlin od společnosti Ferranti patřily v 80. letech minulého století k absolutní špičce. Stroj Somet XYZ 643 byl po úspěšných testech ve firmě Ferranti – Skotsko nazván XYZ 464 B a byl zahájen jeho prodej v Československu.

Na měřicích strojích s prvky výpočetní a řídicí elektroniky od firmy Ferranti byl vývoj dále rozvíjen, a to ve směru konstrukce automatizovaného měřicího stroje. Takový stroj byl postaven v roce 1989 pod označením DCC XYZ 464 B, který získal na mezinárodním strojírenském veletrhu - MSV v Brně v roce 1989 zlatou medaili. [2]

## 3 Stávající konstrukce SMS Berox

Úspěch konstrukce souřadnicového, ručně polohovatelného měřicího stroje Somet Berox XYZ 464B byl založen na nepřekonatelné jednoduchosti a zároveň vynikající funkčnosti a spolehlivosti. Tento stroj vynikal zejména originální konstrukcí závěsu pinoly, ale také soustavou elektro-magnetických spojek, kdy bylo možné přepínat mezi posuvem a mikroposuvem ve všech třech osách. Základní součásti SMS Berox XYZ 464B jsou uspořádány tak, aby bylo dosaženo co možná největší stability a tuhosti. Jak již bylo zmíněno, stroj se v jednotlivých osách pohybuje pouze za pomoci ručního posouvání mostu a pinoly, takže neobsahuje žádné motory ani jiné pohonné jednotky. [3]

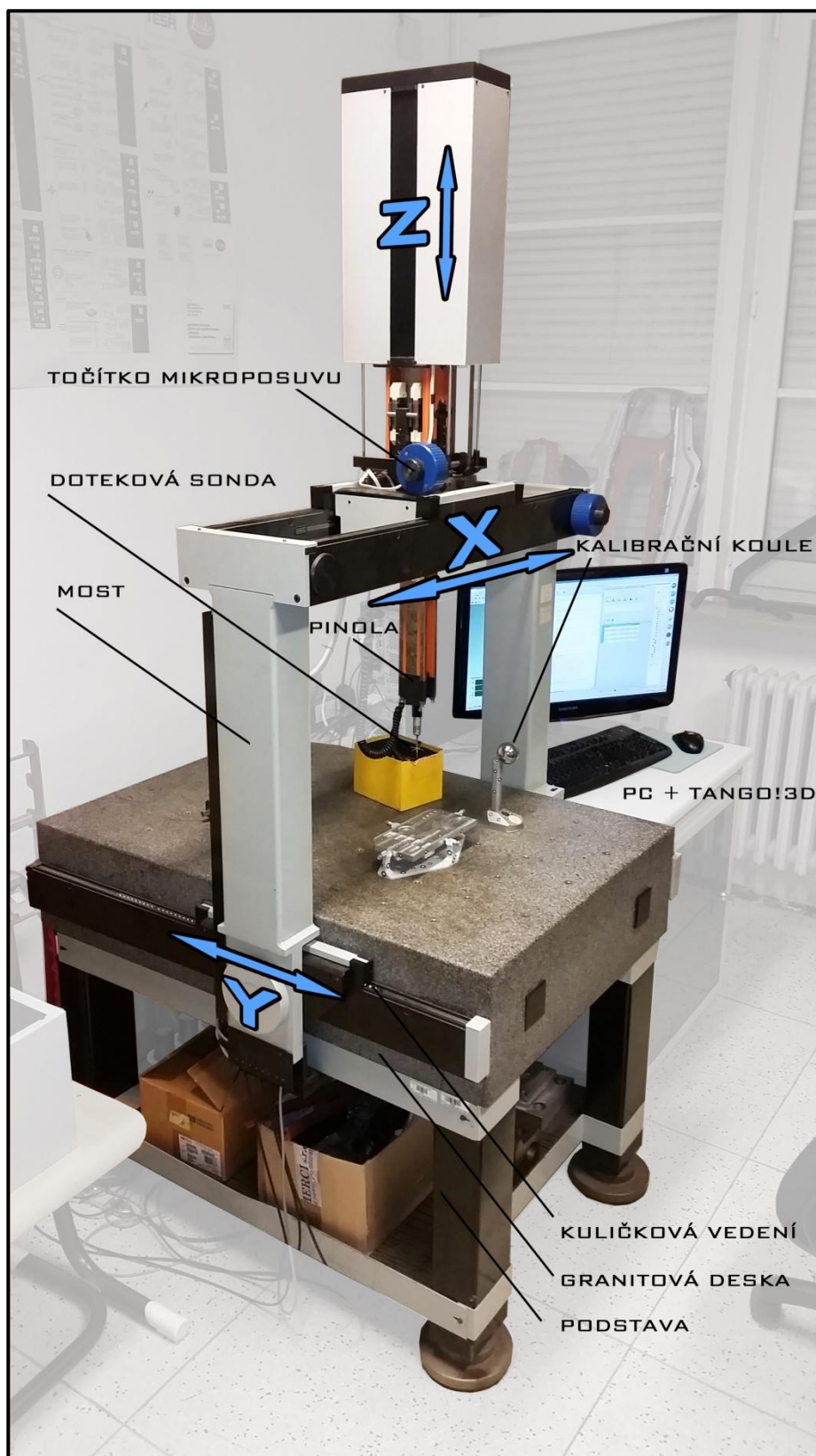
### 3.1 Hlavní části SMS Somet Berox XYZ 646B

Konstrukce měřicích strojů prošly během několika desítek let vývoje ke znatelným vylepšením, avšak základní části a rozvržení strojů zůstávají stále stejné, jako tomu bylo i před více jak 30 lety, kdy tento stroj vznikl.

Stroj se skládá z:

- podstavy,
- granitové desky,
- mostové konstrukce umožňující pohyb se ve třech osách – XYZ, které je možné polohovat i za pomoci mikroposuvu,
- kuličkových vedení,
- dotykové sondy umístěné na pinole,
- kalibrační koule,
- počítače.

Základní části SMS Somet Berox XYZ 464B lze vidět na Obr. 1



Obr. 1: Základní části SMS Somet Berox

### 3.1.1 Podstava

Podstava SMS Berox je tvořena klasickým svařencem připomínajícím stůl, skládající se ze čtyř dutých nohou o rozměru 85x120x492 mm. K těmto nohám je ve vrchní části navařena korunka z plného načisto obrobeného materiálu, která slouží nejenom k pevnému uchycení granitové desky stolu, ale také je v ní uložena v ložiscích hřídel, která slouží k uchycení kladek využívaných k mikroposuvu osy Y. Spodní část každé z těchto nohou je osazena výškově nastavitelným mechanismem vycházejícím z principu šroubu a matice. Rotací šroubu spojeného s pevně uloženou maticí dochází k posunu šroubu v jeho axiální ose. Díky tomuto mechanismu lze jednoduše seřídit vodorovnost granitové desky i na nerovném základním podkladu. Kvalita vodorovnosti granitové desky úzce souvisí s pozdější přesností při měřeních na SMS.

### 3.1.2 Granitová deska

Granitová deska, jež je spojena za pomoci šroubových spojů k podstavě, patří mezi jednu z nejdůležitějších součástí celého stroje. V ose desky se nachází podélné žebro, k němuž je za pomoci šroubových spojů připevněna lišta, která je na jedné boční stěně osazena pohybovým ústrojím. Tato lišta se stýká s ústrojím aretačním, spojeným se spojovacím mezičlenem. Na opačné straně lišty se nachází měřítko, ze kterého je odečítána poloha v ose Y za pomoci snímače. Při montáži stroje na požadované místo je žádoucí, aby deska byla nainstalována s vysokou přesností a vodorovností, neboť je považována za pevnou část celého stroje, dle které jsou další součásti kalibrovány a celý stroj seřizován. Granit neboli žula byl pro firmu Somet těžen v žulových dolech v Africe. Deska byla vyrobena a vybroušena s nevídaně vysokou přesností, kterou lze ocenit i v dnešní době, kdy je po těchto starých kvalitních deskách stále vysoká poptávka. Zatížení celého stolu je až 150 kg a rozsah souřadnic X – 600 mm, Y – 400 mm, Z – 300 mm. [4]

### 3.1.3 Mostová konstrukce

Při konstrukci SMS Berox byla zvolena mostová konstrukce právě zejména díky své jednoduchosti a spolehlivosti. Celá mostová konstrukce je v podstatě jediným pohyblivým prvkem stroje. Jako celek slouží k polohování v ose Y. Most je posuvně uložen ve valivých těliscích, které se nacházejí v levé a pravé liště, jež jsou přidělané

za pomoci spojovacích šroubů ke granitové desce. Toto řešení znamenalo zvýšení účinku celého stroje, snížení hmotnosti a menší nároky na výrobní přesnost, jelikož nemusely být kladeny vysoké požadavky na přesnou výrobu celých lišt, ale pouze jejich horních ploch.

Na mostové konstrukci se dále nacházejí příčné saně, pohybující se v těžišti mostu a jako celek slouží k pohybu v ose X. Na nich je dále umístěn závěs pinoly, která se pohybuje v ose Z. Mostové uspořádání stroje i s vyznačením pohybů v jednotlivých osách lze vidět na Obr. 1.

### **3.1.4 Osy XYZ**

Pohyb po osách XYZ je realizován za pomoci jednoduchých kuličkových hnízd, které mají za úkol snížit tření ve stykových plochách mostu a vedení.

Polohování pinoly v ose Z je zkonstruováno tak, aby bylo možné celou osu polohovat s co nejmenší silou. To je způsobeno důmyslným systémem se symetrickými protizávažími, která vyrovnávají hmotnost a pomáhají lidské obsluze s manipulací pinoly. V okamžiku, kdy je zapotřebí použít mikroposuv, stačí uvést elektromagnet v činnost, čímž dojde k sepnutí pohyblivé kovové destičky a statické části magnetu a zároveň dojde vlivem magnetických sil k sevření kovového pásu mezi nimi. Ruční posuv polohování pinoly se tímto zásahem zaaretuje a umožněn je pouze mikroposuv za pomoci točítka. [5]

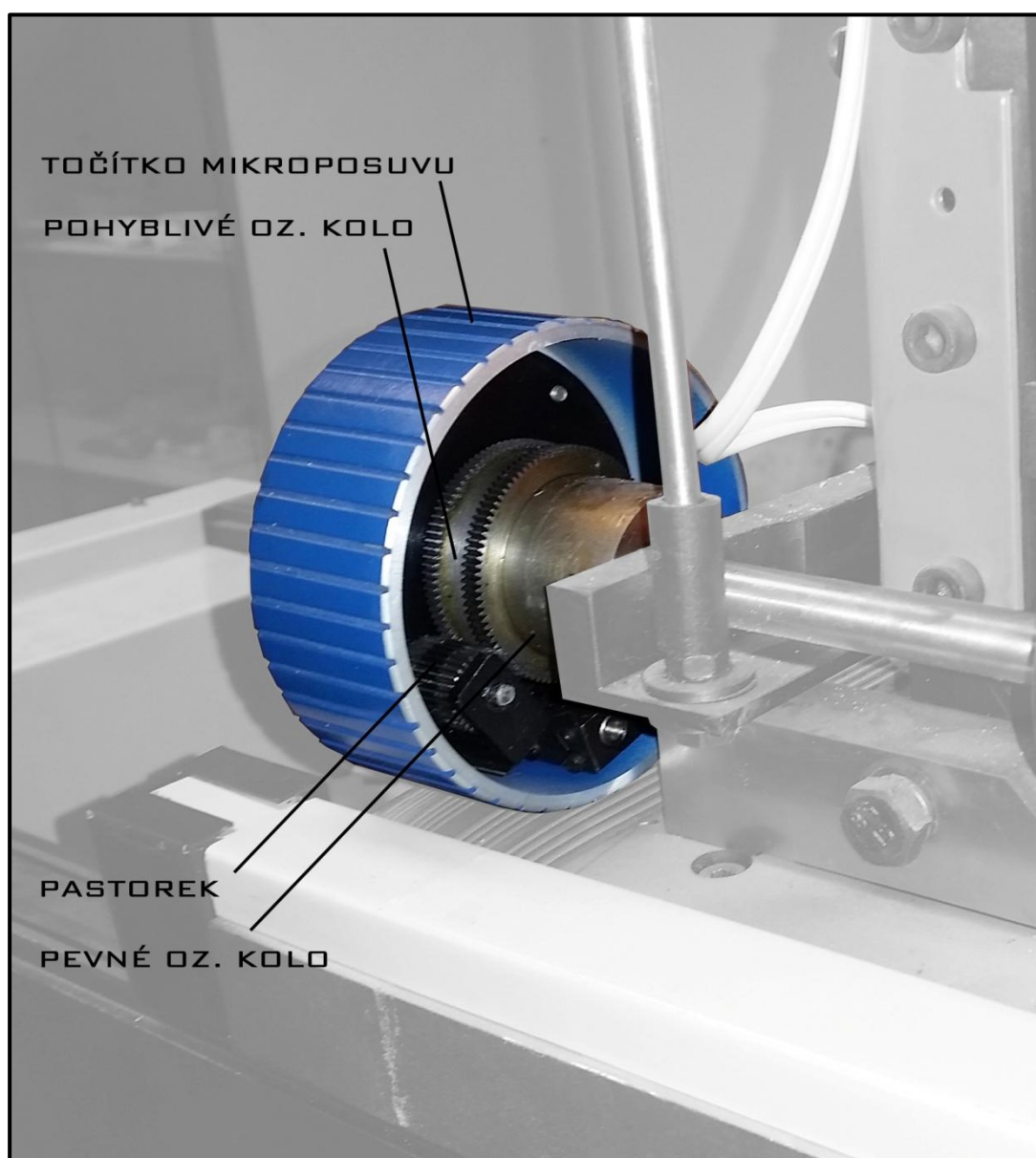
### **3.1.5 Mikroposuvy jednotlivých os**

Jak již bylo zmíněno, každá osa je vybavena ručním mikroposuvem, jehož princip je založen na velkém převodovém poměru do pomala. Uvnitř točítka se nalézá převodové ústrojí, které je tvořeno ozubeným pastorkem, jenž je připevněn za pomoci ploché pružiny a vidlice k točítku samotnému a je v přímém styku s pevným ozubeným kolem, které je spojeno s rámem stroje za pomoci šroubů. Zároveň je pastorek v těsném styku s dalším ozubeným kolem, které je pevně spojeno s hřídelí za pomoci kolíku. Tato dvě ozubená kola se od sebe liší počtem zubů, minimální rozdíl je roven jednomu zubu. Při rotaci točítka dochází k odvalování pastorku po obvodu pevného ozubeného kola a dále k přenosu této rotace na pohyblivé ozubené kolo spojené s hřídelí. Tento pohyb je dále přenášen za pomoci kladek a plechových pásků, díky čemuž je vyvozen přímočarý mikroposuv dané osy. Během jedné otáčky točítka dojde



k pootočení hnací řemenice o úhel daný roztečí  $p = m \cdot \pi$  násobenou rozdílem počtu zubů pevného a rotujícího ozubeného kola.

V tomto případě, kdy pevné ozubené kolo má počet zubů  $z_1=96$  a pohyblivé ozubené kolo  $z_2=95$  se jedná o převodový poměr 96:1. Jedna otáčka pohyblivého kola je tedy rovna 96 otáčkám točítka. Detail mikroposuvu lze vidět na Obr. 2. [6]



*Obr. 2: Detail soustavy mikroposuvu*

### 3.2 Pinola s dotykovou sondou

Snímací zařízení je tvořeno dotykovou sondou PH6, ke které bylo dodáno značné příslušenství s několika snímacími hlavami. Dotyková sonda pracuje na principu vysílání elektrického signálu, který je stavebním kamenem pro získání souřadnic v osách XYZ. Uvnitř sondy se nachází speciální kroužek, po jehož obvodu jsou vytvořeny tři elektricky izolované V-drážky, které mezi sebou svírají úhel 120°. Dotyková část je propojena za pomoci tří ramen, které jsou na jejich koncích osazené kuličkami. Tyto kuličky jsou za pomoci pružiny v klidovém režimu vtlačovány do V-drážek, čímž je zaručeno spojení elektrického obvodu. Při měření a následném doteku rubínové kuličky o měřený objekt dojde k vychýlení kuliček, a tím k rozpojení elektrického obvodu a zároveň k vyslání signálu, který je dále zpracováván. [7]

Na Obr. 3 lze vidět dotekovou sondu Renishaw PH6. S dotekovou sondou je možné pohybovat pouze ve směru osy Z a za pomoci pohybu mostu v ose X a Y. Revoluční technologie firmy Renishaw umožňuje ale tří i pětiosé kontaktní skenování. Díky tomu dochází ke zvýšení rychlosti, přesnosti a až 50-ti násobnému zvýšení výkonu kontroly. [8]



Obr. 3: Doteková sonda Renishaw PH6

### 3.3 Odměřovací zařízení

V roce 2007 byla na SMS provedena částečná modernizace, která se týkala výměny již zastaralého odměřovacího zařízení Heidenheim LS403 za zcela nové Renishaw RGH 22 Z30 komunikující s vyhodnocujícím softwarem Tango!3D. Tato modernizace přinesla nejen diametrální zlepšení všech odměřovacích vlastností stroje, ale také razantní zrychlení vyhodnocujících procesů díky kompatibilitě s novým softwarem fungujícím na PC z 21. století.

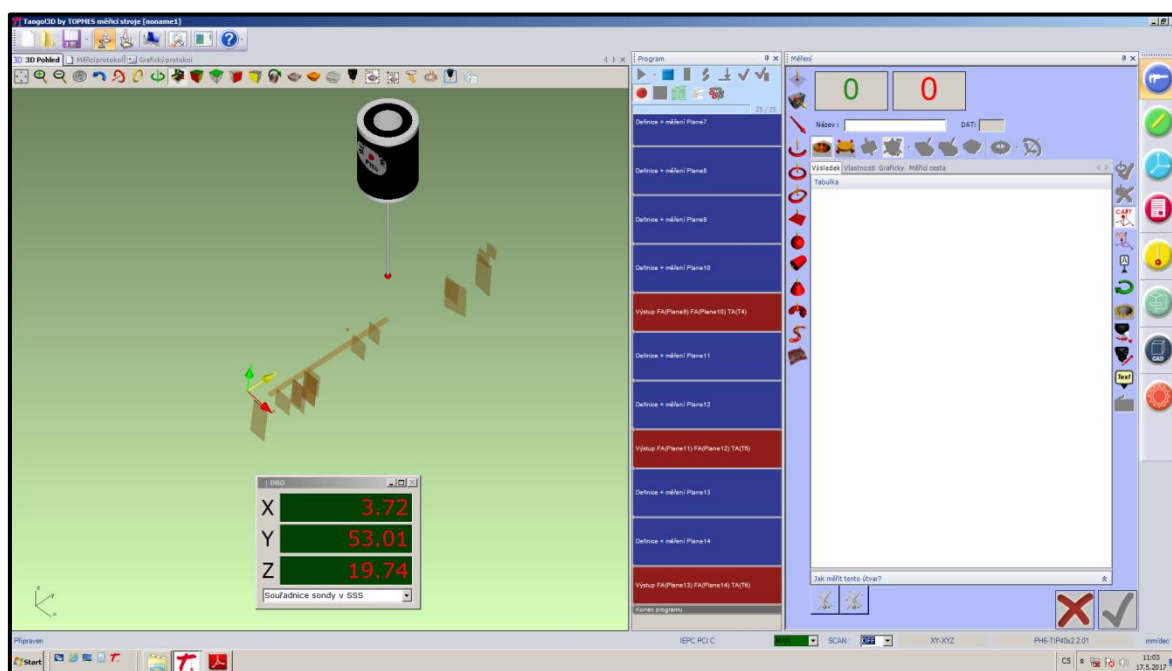
Renishaw RGH 22 je inkrementální, bezkontaktní, optoelektrický snímač, který si vydobyl za dobu své existence vynikající pověst a to nejenom v oboru metrologie, ale také v lékařství, fotovoltice a u obráběcích strojů. Zařízení se skládá z RGS pozlacené páskové lineární stupnice a patentovaného optického snímače. Základem funkce takového snímače je infračervený paprsek z LED diody, osvětlující s periodou  $20\mu\text{m}$  soustavu fazet pozlaceného měřítka. Dále je paprsek usměrňován pomocí difrakční mřížky na pole fotodetektorů. Po průchodu odraženého světla ze soustavy fazet, dojde na fotodetektoru k vytvoření difrakčního obrazce znázorňujícího čistý sinusový průběh intenzity světla. Celkový optický signál je strukturován z více než osmdesáti fazet. Zesílený a převedený elektrický signál je dále vyveden k výstupu snímače.

Důležitým prvkem je dále pozlacená pásková lineární stupnice o rozsahu  $20\mu\text{m}/40\mu\text{m}$  a přesnosti  $\pm 15\mu\text{m}$ . Tato stupnice je velmi pružná a její montáž tkví v přímém nalepení na stroj, díky čemuž měřítka přijme teplotní koeficient roztažnosti stroje za svůj a přesnost snímače závisí tudíž pouze na přesnosti stupnice měřítka.

Aby celý tento systém fungoval, je nutné buď kdekoli na měřené ose umístit tzv. referenční bod, ze kterého se při měření dále vychází (snímače Renishaw využívají jako referenční bod Hallovu sondu), nebo stanovit po zapnutí stroje nové nulové souřadnice polohy sondy.[9][10]

### 3.4 PC s vyhodnocovacím softwarem Tango!3D

Bez počítače s vyhodnocovacím softwarem by byl SMS pouze drahou hračkou. SMS Somet Berox je po modernizaci, provedené v roce 2007, vybaven softwarem Tango!3D 4.1.102.0. Uživatelské rozhraní softwaru je k vidění na Obr. 4. Jedná se o měřicí software s grafickou podporou, díky kterému je možné měřit součásti všech tvarů, od těch nejmenších až po několika-metrové modely, s ohledem na možnosti konstrukce SMS. Dále je schopen měřit veškeré základní geometrické útvary, porovnávat je s naimportovanými CAD daty, vytvářet jednoduché modely z naměřených hodnot a v neposlední řadě samozřejmě vytvořit přehledný protokol o měření. Výhodou softwaru je možnost jeho využití jak u ručních, tak u CNC souřadnicových měřicích strojů. V současnosti je bohužel vývoj tohoto softwaru ukončený. Jeho nástupcem je software TouchDMIS, který je taktéž vyvíjen v České republice. [11]

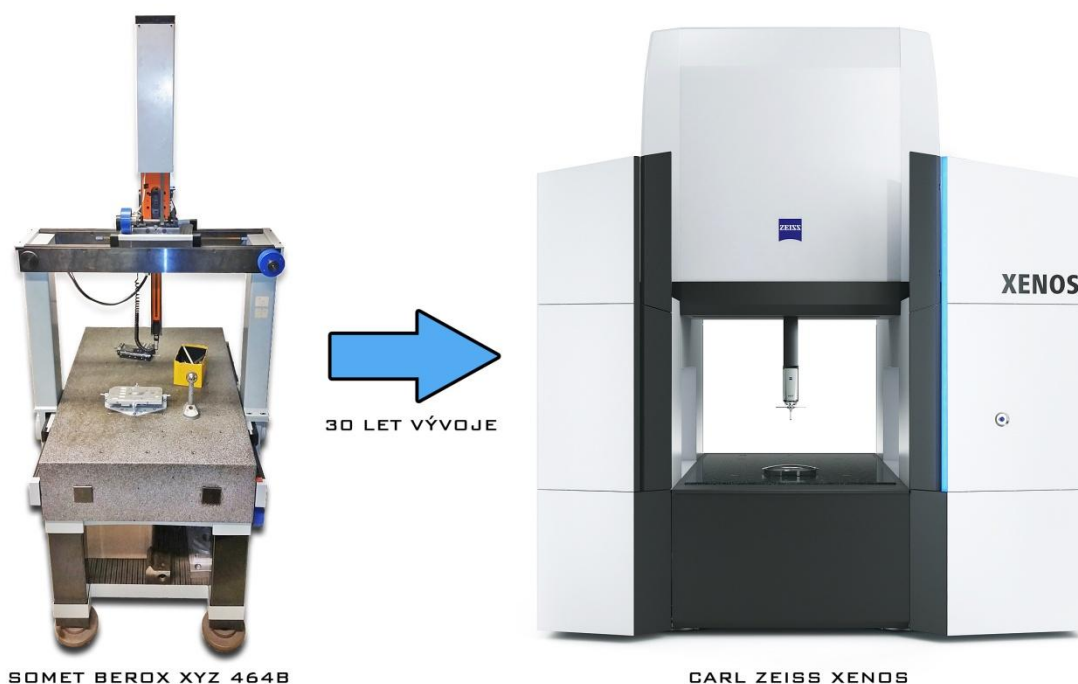


Obr. 4: Rozhraní softwaru Tango!3D

## 4 Současné trendy SMS

V současné době dochází ve vývoji souřadnicových měřicích strojů na první pohled k určité stagnaci. Desítkami let vyzkoušené tvary SMS se prakticky nemění a může se tedy zdát, že není co zdokonalovat. Avšak vlivem neustále se zrychlujících, zdokonalujících procesů ve výrobě je nutné v oblasti kontroly a měření rozměrů neusnout na vavřínech. K neustálému vývoji dochází zejména u komponentů, které nejsou pro laika na první pohled viditelné. Tento vývoj se týká zejména využívání kvalitnějších materiálů s lepšími fyzikálními vlastnostmi, využití kvalitnějších a přesnějších pohonů, chovajících se šetrně k životnímu prostředí, s co možná nejmenšími nároky na napájení, dále odměřovací techniky a softwarového rozhraní.

V současné době patří mezi světovou špičku ve výrobě souřadnicových měřicích strojů např. japonská firma Mitutoyo, německá firma Carl Zeiss a další. Obr. 5 nabízí porovnání zhruba 30-letého pokroku mezi strojem Somet Berox a SMS Xenos od společnosti Zeiss.



Obr. 5: Vývoj SMS

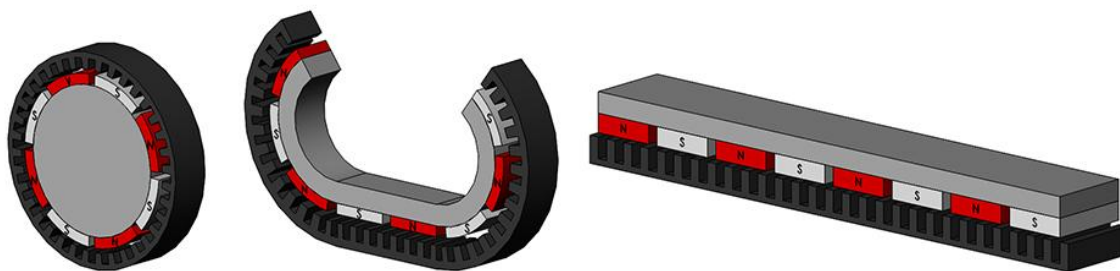
Zdroj: vlastní zpracování, [12]

## 4.1 Lineární synchronní elektromotory

Jednou z novinek posledních let, uplatňujících se zejména u prémiových SMS, jsou pohony os využívající lineárních elektromotorů. Tyto lineární motory fungují v podstatě na stejném principu jako motory rotační, avšak v tomto případě je rotor ve valné většině případů lineárně rozvinut a na něm se po vzduchové mezeře pohybuje stator (jezdce).

Primární část (stator) je tvořena elektrotechnickými plechy vyrobenými z feromagnetického materiálu a trojfázového vinutí uloženého v drážkách jednotlivých plechů. Protilehlá strana je tzv. sekundární (rotor). Tato část je tvořena permanentními magnety. Po přivedení elektrického proudu do vinutí pohyblivé části pohonu dojde ke vzniku magnetického pole mezi primární a sekundární částí, což má za důsledek uvedení jezdce do přímočarého pohybu. Regulací přiváděného proudu lze ovládat rychlost pohybu jezdce po primární části.

Hlavními klady lineárních elektromotorů jsou absence mechanických převodových prvků, eliminace mechanického opotřebení, vysoká přesnost, dynamika pohybu, dlouhá životnost a široký rozsah využívaných sil a rychlostí. Nevýhodami lineárních elektromotorů může být vyšší pořizovací cena v porovnání s klasickými rotačními motory, nutnost vedení elektrické energie po celé délce dráhy k pohyblivému jezdci a vyšší vývin tepla. Na Obr. 6 lze vidět podobnost rotačního elektromotoru s lineárním elektromotorem. [12][13]



*Obr. 6: Podobnost rotačního a lineárního elektromotoru*

Zdroj: [14]

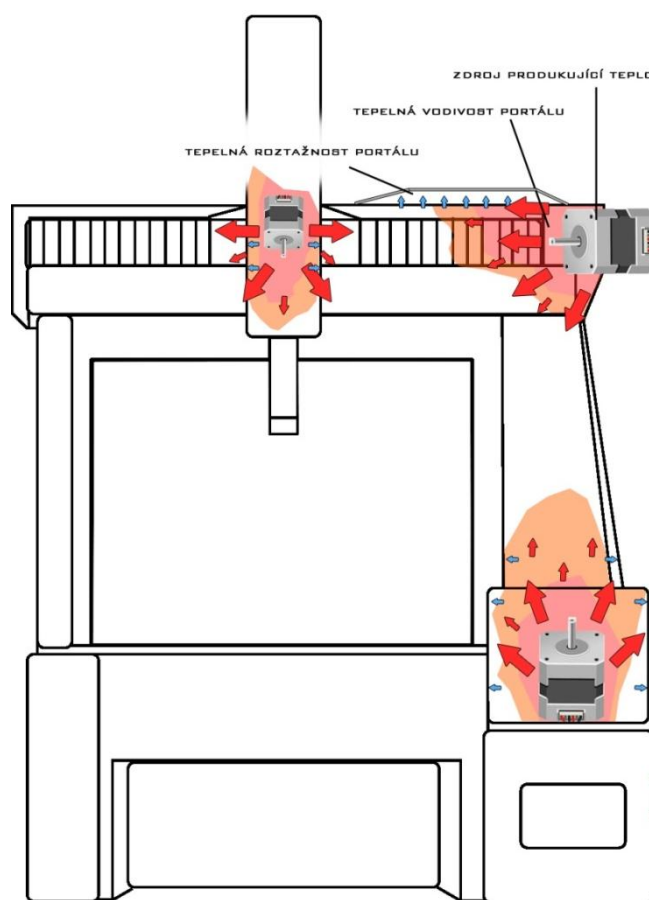
Soustava, využívající ke svému polohování lineární motory, je realizována např. ve vrcholném modelu Xenos, produkovaném značkou Carl Zeiss. Tento model oplývá dalšími jedinečnými prvky, jako například komponenty z karbidu křemíku, vylepšenou aktivní referenční snímací hlavou, velmi přesným pohybem po vzduchových ložiscích a také výjimečnou elektroniku a řízením celého stroje. [12]

## 4.2 Odměřovací pravítka

Zajímavým řešením, eliminujícím vznik nepřesností při měření, vznikajících vlivem teplotní roztažnosti materiálu, které využívají někteří výrobci SMS, je řešení systému odměřovacích pravítek s prakticky nulovým koeficientem roztažnosti (Zerodur, Robax a další) uložených na olejovém filmu. Tato pravítka nejsou nalepena přímo na daných částech SMS, jako je tomu u řešení jiných výrobců. Jejich kluzné uložení ale umožňuje použití konstrukčních prvků vyrobených z materiálů o vysoké tepelné vodivosti (hliník, speciální keramika atd.) a tím snížení vlivů teplotních gradientů bez vlivu na stabilitu odměřování SMS. Odměřování je naprosto stabilní a nezávislé na teplotě, ve které je stroj provozován, což je zásadní podmínkou zejména u konstrukcí určených k měření přímo ve výrobním procesu. Podmínka pro realizaci takového konceptu je ale existence precizní teplotní kompenzace součásti, protože koncepce teplotně naprosto stabilního odměřování nepřispívá ke kompenzaci teplotní roztažnosti dílu. V minulosti byly některé SMS z tohoto důvodu konstruovány z oceli, s měřítky nalepenými přímo na osách stroje s tím, že se předpokládala automatická kompenzace teploty měřeného ocelového dílu tepelnou dilatací os stroje. Dnes je tato koncepce zcela překonána z mnoha důvodů (tepelná vodivost oceli, nedokonalé temperování dílů, neshoda teplotního koeficientu většiny měřených dílů s koeficientem použité konstrukce SMS apod.). [16]

### 4.3 Využívání vhodnějších materiálů pro konstrukci stroje

V dřívějších dobách byla hojně využívána u většiny komponentů SMS, s výjimkou granitové desky stolu a dalších několika částí, jako hlavní konstrukční materiál ocel. Tento lety ověřený materiál byl poměrně snadno dostupný a na dřívější třídy přesnosti SMS poskytoval i poměrně uspokojivé výsledky. Neustálým vývojem technologií a stále se zdokonalujícím procesům musela ocel, díky svým ne zcela vyhovujícím fyzikálním vlastnostem, vyklidit první příčky konstrukčních materiálů využívaných pro stavbu SMS.



*Obr. 7: Ukázka přenosu tepla SMS*

Zdroj: vlastní zpracování, [15]

Nevhodnost využití ocelí, využívaných při konstrukci mostu, lze demonstrovat na Obr. 7, kde dochází k přenosu tepla mezi elektromotorem a samotným mostem (vývin tepla je standardní jev u velkého množství pohonů využívaných u SMS). Toto teplo je vedeno, vlivem rozdílné kinetické energie molekul motoru a mostu, dále na



most. Tímto jevem dochází k lokálnímu zahřívání styčných ploch, což posléze při měření vede k výrazným nepřesnostem vlivem teplotních rozdílů a teplotní roztažnosti na různých místech mostu.

V současné době se pro konstrukci některých částí SMS, jako např. mostu, volí materiály s výhodnějšími fyzikálními vlastnostmi a to zejména v oblasti tepelné vodivosti a teplotní roztažnosti. Mezi hojně využívané materiály lze zařadit hliník, keramiku, nebo granit. Každý z těchto materiálů oplývá různými fyzikálními vlastnostmi a každý z výrobců SMS se vydává jinou cestou konstrukce.

Výše zmíněný jev rozdílných teplot na různých částech mostu, vznikající u součástí vyrobených z oceli, je tedy mimo jiné možné eliminovat náhradou ocelových materiálů např. za hliník, jehož součinitel teplotní vodivosti  $\lambda$  je až třikrát vyšší. Díky této vlastnosti hliníku dojde k vedení tepla po celém objemu mostu rovnoměrněji a tím nedochází při následných měření na stroji k nepřesnostem způsobených vlivem lokálních změn teplot součástí.

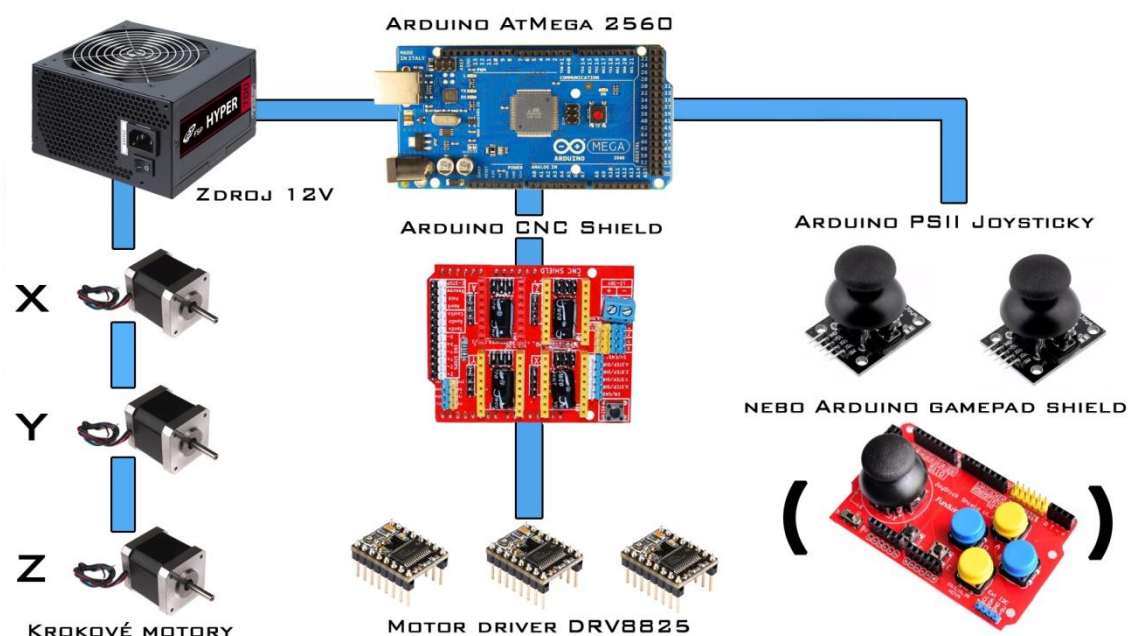
Dalším případem může být pro konstrukci některých částí SMS využití granitu, jehož teplotní vodivost je naopak v porovnání s hliníkem až 60 krát menší. Granit prakticky nedovoluje k šíření tepla mezi součástmi. Díky této vlastnosti je zaručena tepelná stálost součástí a při následném měření by neměly v hodnotách vznikat různé výkyvy, vlivem lokálních změn teplot a teplotní roztažnosti, jako např. u součástí vyrobených z oceli.

Další z řady možností je využití inovativních materiálů, vytvořených na bázi keramiky, jako je např. keramika z karbidu křemíku. Tento materiál je využit zejména u nejvyšších řad SMS - např. významný výrobce SMS, Carl Zeiss, jej využívá u své vrcholné řady Xenos a to u komponentů důležitých pro přesnost. Keramika z karbidu křemíku poskytuje v porovnání s keramikou z oxidu hlinitého až o 50 procent nižší tepelnou roztažnost, o 30 procent vyšší tuhost a o 20 procent nižší hmotnost. V porovnání s ocelí dosahuje dvakrát vyšší tuhosti při poloviční hmotnosti. [16]

## 5 Návrh řešení – varianta A

V první fázi konstruování bylo nutné seznámit se se strojem jako takovým a od základu pochopit jeho funkčnost a konstrukci. První překážkou, která se objevila již v samém úvodu, byla nemožnost stroj alespoň částečně demontovat z důvodu možného poškození cejchování seřazených součástí stroje. Z tohoto důvodu bylo poměrně obtížné zaměřit důležité stávající součásti potřebné ke zkonstruování nových dílů. Tyto potíže se částečně podařilo odstranit díky výkresům jedné z variant měřicího stroje Berox, které zapůjčil ze svého archivu konstruktér stroje pan Ing. Jiří Miletín. Po zaměření důležitých rozměrů byly vytvořeny skici s potřebnými rozměry stroje.

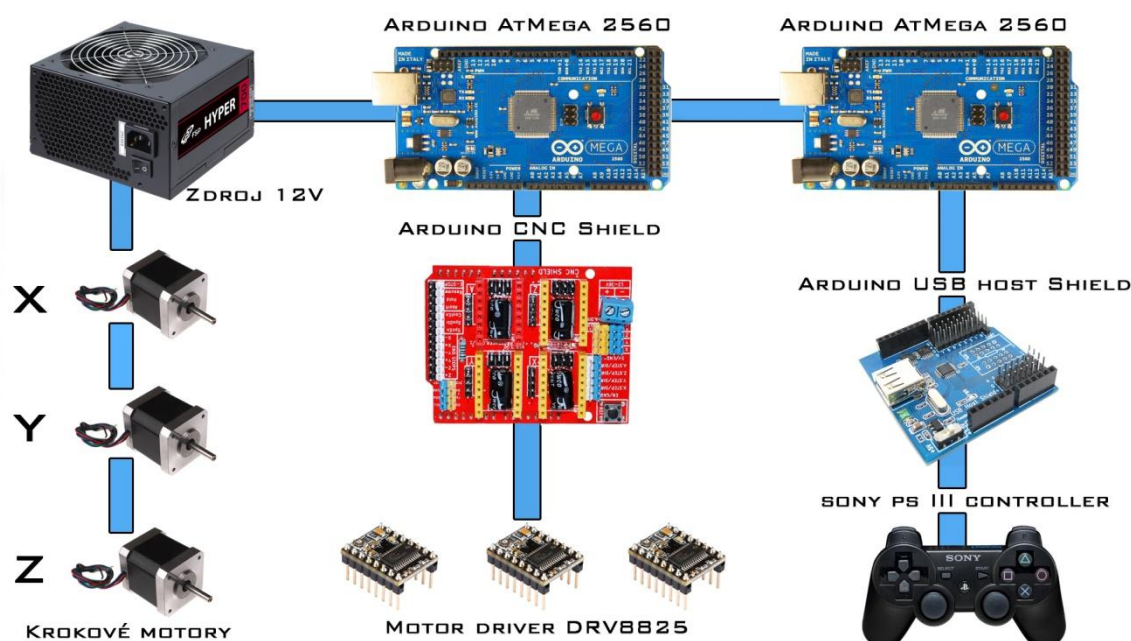
Ve variantě A pro návrh pohonné soustavy stroje Somet Berox je plánováno využití programovatelné platformy Arduino jako řídicího prvku stroje. Základem celé soustavy je hardwarová karta Arduino AtMega2560, ke které jsou připojeny další shieldy, díky kterým je umožněno řízení motorů a jejich následné ovládání. Schématické znázornění prvků této soustavy lze vidět na Obr. 8. Podrobný popis jednotlivých prvků je dále rozepsán v kapitole 5.1. V této variantě je počítáno, že celá soustava tří motorů polohujících osami XYZ bude ovládána za pomoci Arduino PSII joysticků.



Obr. 8: Schéma soustavy - Varianta A01

Druhým možným řešením ovládání motorů ve variantě A je využití kontroleru Sony Playstation III, který je běžně využíván v herním průmyslu. Tento ovladač je vynikajícím řešením, neboť díky němu lze snadno ovládat několika-osé stroje. V případě využití kontroleru Sony, je nutné propojit se základní deskou Arduino další shield nazývaný USB host. Tento shield propojí kontroler s deskou pomocí bezdrátové bluetooth technologie, díky čemuž se SMS stane mnohem snáze ovladatelnějším. Toto řešení lze vidět na Obr. 9, kde je schématicky znázorněna soustava zapojení. Ostatní komponenty zůstávají nezměněny.

Úskalí této varianty však tkví ve složitosti propojení základní desky Arduino Mega 2560 a USB shieldu. Pro úspěšné propojení je nutné v prvním případě využít druhé základní desky Arduino a za pomoci kódu tyto desky spolu spárovat a zajistit jejich komunikaci mezi sebou. Druhou možností je vytvoření speciálního firmware programu přímo v PC, který by komunikoval s platformou Arduino a PSIII kontroler by byl připojen přímo k danému PC.



Obr. 9: Schéma soustavy - Varianta A02

## **5.1 Mechanické komponenty potřebné k realizaci**

K úspěšné realizaci navrženého pohonného systému – varianta A, pro souřadnicový měřicí stroj Somet Berox XYZ 464B, je nutno část komponentů vyrobit a část komponentů nakoupit ve specializovaných obchodech. Všechny tyto komponenty dávají dohromady jeden funkční celek a každý z nich je nepostradatelnou součástí celé soustavy.

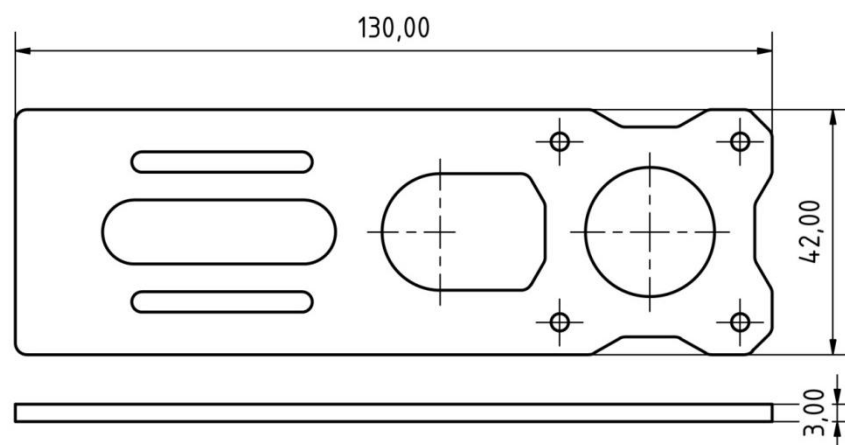
### **5.1.1 Konstrukce držáků motorů**

Prvními prvky, které by bylo nutné navrhnout, byly držáky motorů všech tří os - XYZ. Otázkou bylo, jak tyto držáky přichytit ke stroji, aniž by bylo nutné vyvrtat nové otvory do jednotlivých dílů stroje, které by mohly být náchylné na otřesy a rázy způsobené vrtáním a jejich deformace by mohla ohrozit celou funkčnost SMS.

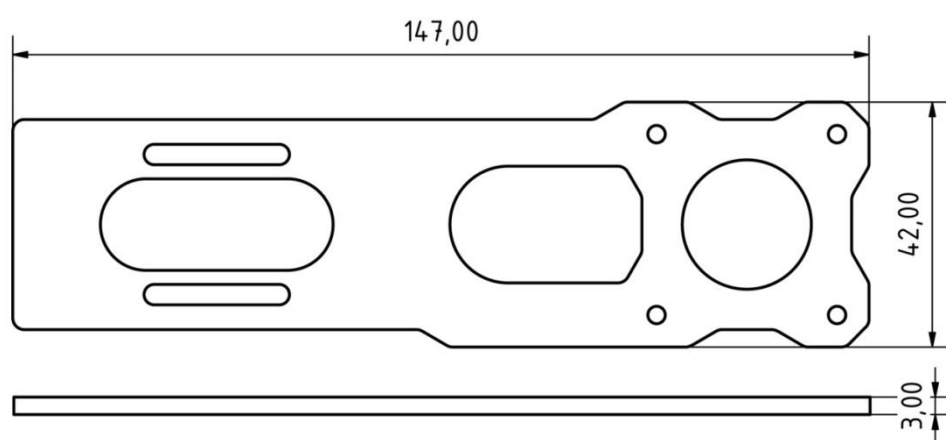
Jako vhodné řešení se ukázalo využít dvě stávající díry o průměru 3 mm, které sloužily pro uchycení převodových ústrojí mikroposuvů. Na základě naměřených rozměrů stroje a výkresové dokumentace SMS Somet Berox byly vytvořeny CAD modely držáků motorů pro osy XYZ a následně bylo plánováno tyto modely vyexportovat do formátu DXF a odeslat k vypálení na CNC laserové pálicí zařízení. Materiál pro výrobu držáků byla zvolena standardní ocel s označením S235JRH o tloušťce 3 mm.

Vzhledem k nutnosti každý mechanický převod obsahující pružný člen napínat, v našem případě ozubený řemen, je držák motoru vybaven posuvnými drážkami pro vyvození potřebného napnutí řemene.

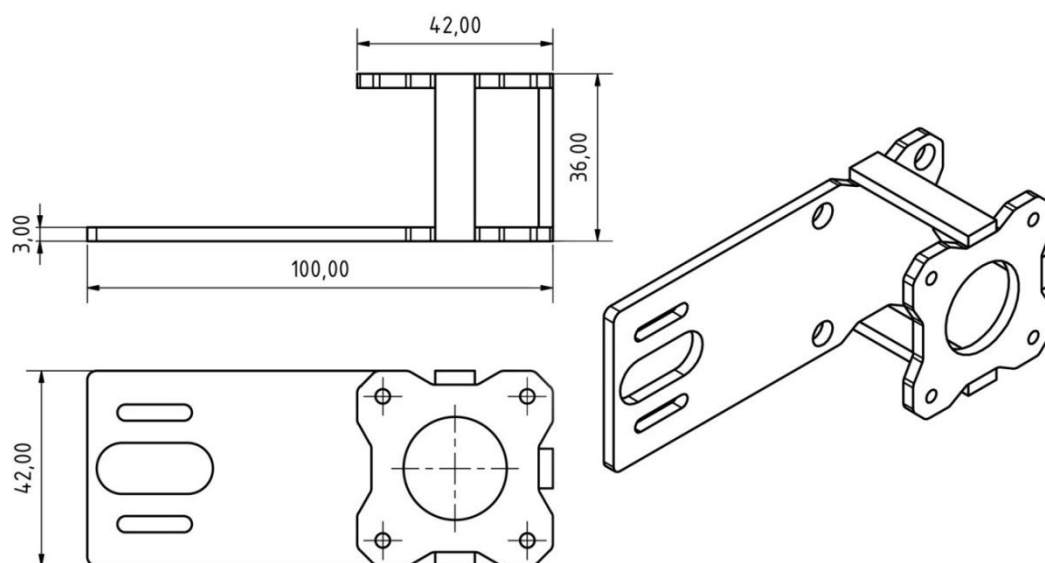
Na Obr. 10, Obr. 11, Obr. 12, vyobrazených na další straně, lze vidět základní rozměry držáků motorů s uchycením Nema 17 pro osy XY a Z. Podrobná výkresová dokumentace držáků je dále přiložena v přílohách č.1 a č. 2.



Obr. 10: Nákres držáku motoru pro osu X



Obr. 11: Nákres držáku motoru pro osu Y



Obr. 12: Nákres držáku motoru pro osu Z

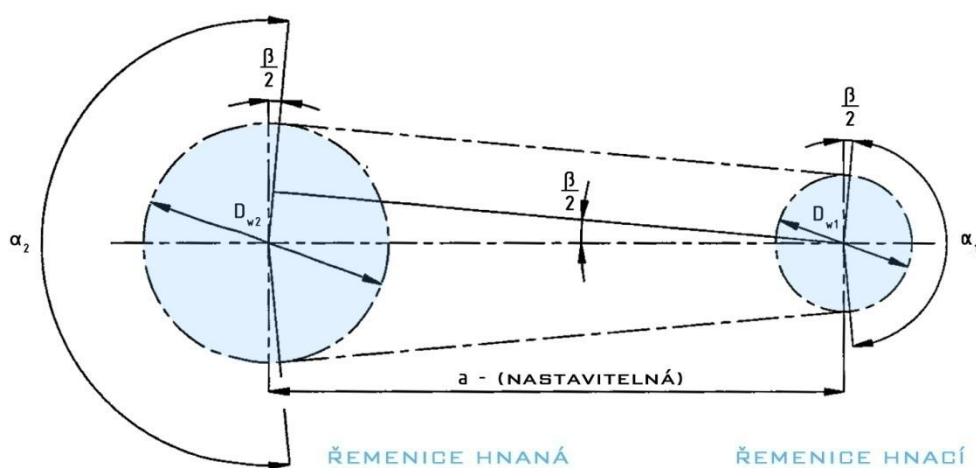
### 5.1.2 Návrh převodů

Při návrhu a plánování převodů bylo nutno veškeré nové součásti konstrukčně přizpůsobit s ohledem na montáž ke stávajícímu zařízení. Novými komponenty, které bylo nutné k držákům motorů - viz kapitola 5.1.1 nainstalovat a navrhnout, byly mechanické převody mezi motorem a pojezdovým ústrojím. Dále bylo během prvotního seznámení s konstrukcí SMS zjištěno, že stávající plechové pásky, které slouží jako jedna ze součástí elektromagnetických spojek v osách XYZ, jsou zcela nevyhovující. Tyto pásky jsou po stisknutí daného tlačítka přitlačeny přitažlivou silou k magnetu. Výsledkem toho je možnost pohybu os za pomoci mikroposuvu. Avšak vlivem času došlo k degradaci materiálu na těchto plechových páscích, jejich prověšení, pokroucení a mírnému zareznutí. Díky těmto vadám dochází při pohybu os nejenom k vyluzování nepříjemných zvuků, ale také k nepřesnostem při pohybu vlivem velké pružnosti prověšených pásků. Tyto pásky je nutné tedy kompletně vyměnit a nahradit je novými ozubenými řemeny, z čehož plyne, že je nutné nahradit i stávající kladky za ozubené řemenice a to kompletně ve všech třech osách stroje.

## Řemenový převod mezi motorem a pojezdovým ústrojím v ose X

První osou, na které byl instalován zkušební krokový motor, byla osa X. Tato osa byla vybrána pro testování komponent zejména pro její snadnou montážní dostupnost. Vzhledem k faktu, že bylo prakticky nemožné zjistit celkovou hmotnost celé mostové konstrukce SMS, byla pro testování pohonu a převodu zvolena metoda pokus omyl. Využit byl tedy krokový motor s označením SX17-1005LQCEF, tento motor je hojně využíván zejména pro pohon menších 3D tiskáren, které by se svou konstrukcí daly přirovnat k SMS Somet.

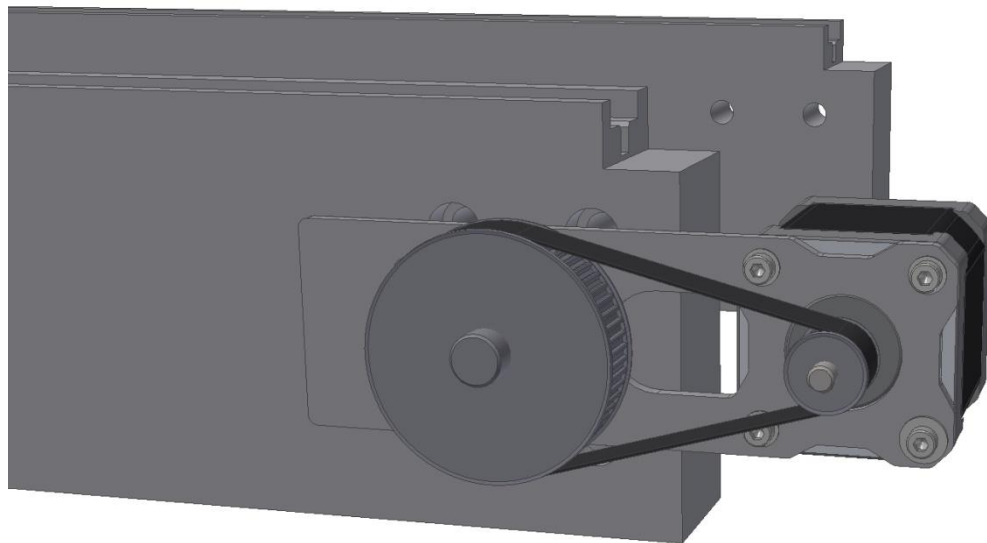
Vzhledem ke stávajícím nevhodným zástavbovým prostorům byla zvolena varianta přenosu a transformace výkonu mezi motorem a pojezdovým ústrojím za pomoci mechanického řemenového převodu. Jako nejvhodnější se ukázalo použití řemenového převodu s tvarovou vazbou, tedy ozubeným řemenem a řemenicí. Jednoznačnými výhodami tohoto převodu jsou tichý chod, tlumení momentových rázů vlivem pružnosti řemene, nízké pořizovací náklady a možnost jednotlivé komponenty přímo nakoupit u výrobce. Není tedy nutné žádné součástky složitě vyrábět. Další výhodou řemenových převodů je nutnost pouze minimálního předpětí řemene, což je řešeno možností posuvu držáku motoru v horizontálním směru. Tím dojde ke změně rozteče hnací a hnané hřídele a následně k napnutí řemene. Nevýhodou těchto převodů je větší náchylnost k poškození vlivem nevhodných provozních podmínek, jako je např. prašnost prostředí, vysoké teploty atd. Avšak SMS bude využíván pouze ve velmi čistém prostředí, proto není nutné se touto nevýhodou dále zabírat. [17]



Obr. 13: Geometrie řemenového převodu s tvarovou vazbou

Zdroj: [17]

Na Obr. 14 lze vidět v perspektivním pohledu 3D sestavu navrhovaného převodu pro osu X, vytvořenou v programu Autodesk Inventor.



*Obr. 14: Sestava pohonu v ose X*

Řemenový převod je tvořen dvěma ozubenými řemenicemi o průměrech  $D_{w1} = 14,32 \text{ mm}$  pro hnací ozubenou řemenici a  $D_{w2} = 47,75 \text{ mm}$  pro řemenici hnanou. Počty zubů  $z_1=18$  a  $z_2=60$ . Na Obr. 13 lze vidět geometrii řemenového převodu. Z těchto hodnot lze vypočítat převodový poměr řemenového převodu, který je dán vztahem

$$i = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{D_{w2}}{D_{w1}} = \frac{Z_2}{Z_1} = \frac{60}{18} = 3,333 \quad (1)$$

kde  $i$  je převodový poměr,  $\omega$  úhlová rychlost [ $\text{rad.s}^{-1}$ ],  $D_w$  výpočtový průměr řemenice [m],  $Z$  počet zubů řemenice.

Výsledné převodové číslo je tedy rovno hodnotě 3,333. Ze vztahu  $i > 1$  vyplývá, že jde o převod do pomala, při kterém dochází ke snižování úhlové rychlosti a ke zvyšování momentu.

Dalším nutným údajem, kterého bylo nutno dosáhnout za pomoci výpočtu, je délka ozubeného řemenu, kterým je opásáno soukolí. Do vzorce pro výpočet délky



řemene je nutné dosadit kromě známých hodnot průměrů ozubených řemenic a zvolené rozteče řemenic ještě hodnotu označovanou jako úhel beta. Tato hodnota vychází z geometrie řemenového převodu a lze ji vypočíst vztahem

$$\frac{\beta}{2} = \arcsin \frac{D_{w2} - D_{w1}}{2a} \quad (2)$$

kde  $\beta$  je doplňkový úhel [rad],  $D_w$  výpočtový průměr řemenice [m],  $a$  osová vzdálenost řemenice [m].

V některé literatuře dojde u výpočtu délky řemene k určitým úpravám vzorce s využitím Mc Laurinova rozvoje v důsledku velmi malého úhlu beta, díky čemuž se vzorec může částečně lišit. Avšak v tomto případě bude výpočet pro délku řemene vycházet ze vztahu

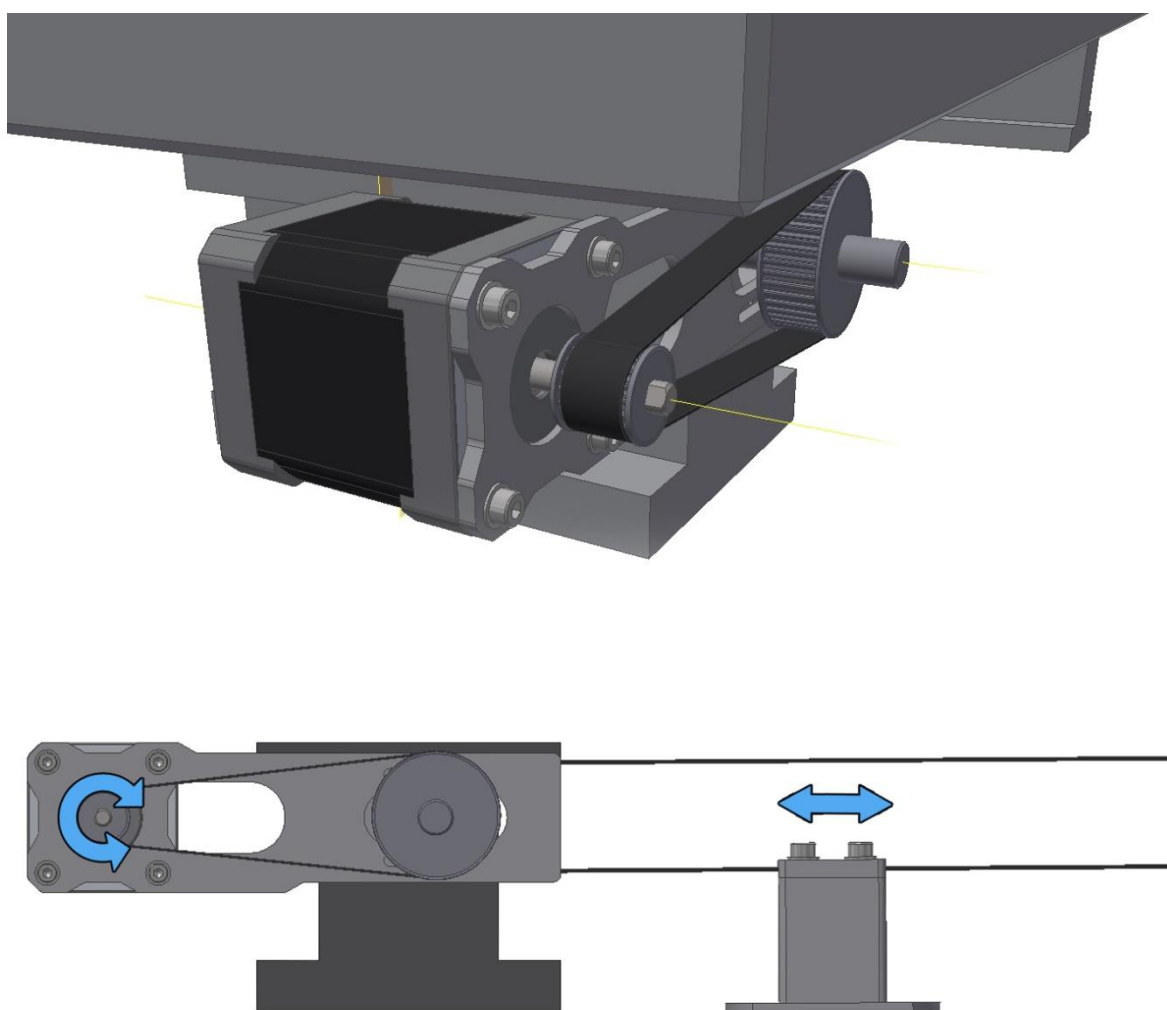
$$L = \pi \frac{D_{w1} + D_{w2}}{2} + \frac{D_{w1} - D_{w2}}{2} \beta + 2a \cos \frac{\beta}{2} \quad (3)$$

kde  $D_w$  je výpočtový průměr řemenice [m],  $\beta$  doplňkový úhel [rad],  $a$  osová vzdálenost řemenice [m].

Délka konečného řemene pro řemenový převod v ose X se tedy rovná 221 mm. Tuto hodnotu je nutno s ohledem na nabídku výrobců a dodavatelů řemenů mírně uzpůsobit a zvolit co možná nejbližší vyšší hodnotu vypočtené délky. Díky možnosti napínání řemene za pomoci posuvu držáku motoru nezpůsobují tyto mále rozdíly oproti vypočítané hodnotě délky řemene žádné potíže. Na základě nabídky výrobce řemenů Tyma CZ byl pro osu X zvolen PU řemen 10T2.5-0230 s profilem T2,5 o délce  $L_w = 230\text{mm}$  a šířkou 10mm (šířku řemene bude nutno upravit za pomoci skalpelu dle hnací řemenice) od firmy Contitech. [17]

### Řemenový převod mezi motorem a pojezdovým ústrojím v ose Y

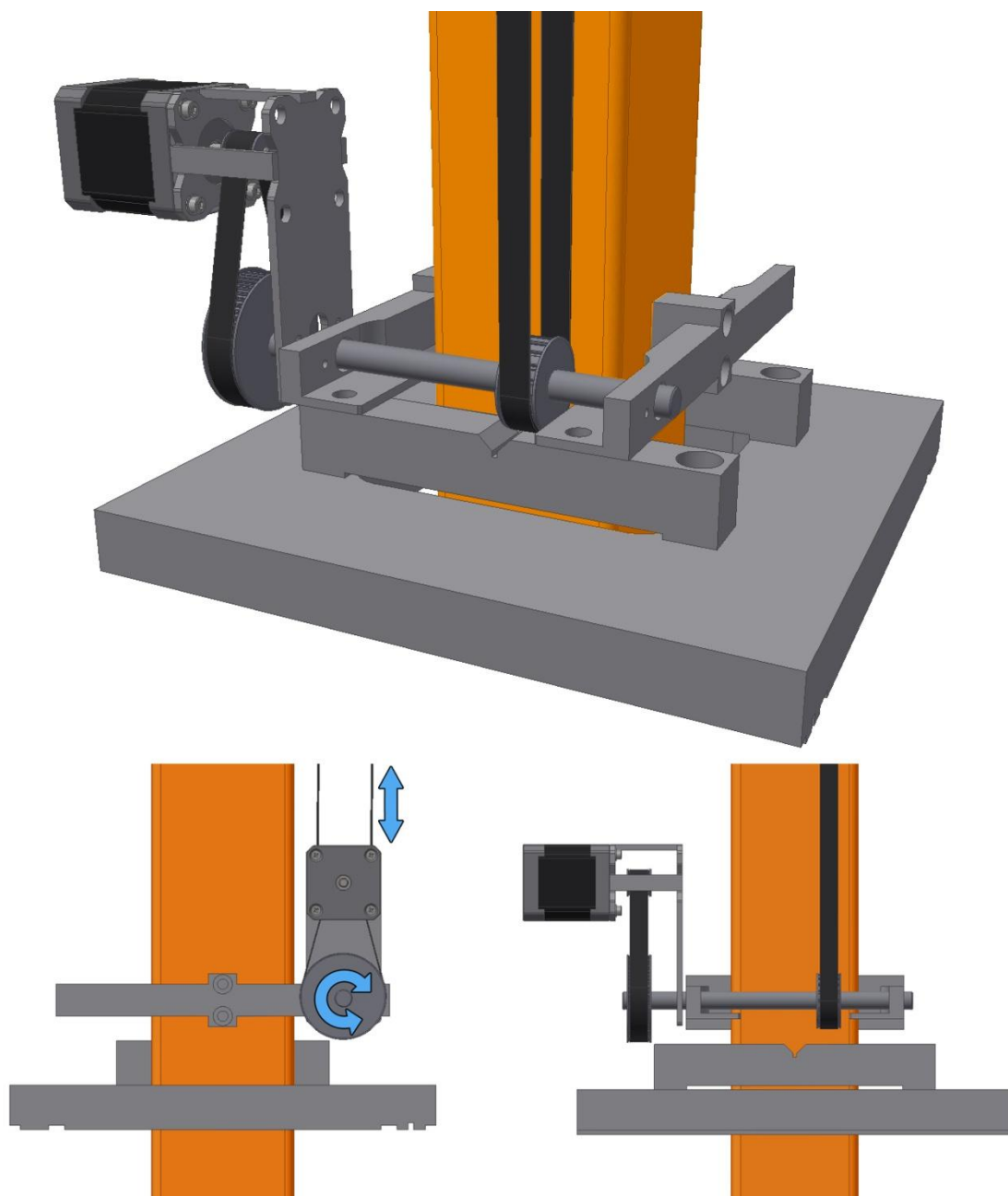
Převod ozubeným řemenem, který je navržen pro osu Y, vychází ze stejných výpočtů a principů jako v ose X. Díky vhodně zvolenému poměru ozubených řemenic nebylo nutné navrhovat žádné změny převodového poměru. U této osy byly tedy použity ozubené řemenice o průměrech  $D_{w1} = 14,32 \text{ mm}$  pro hnací ozubenou řemenici a  $D_{w2} = 47,75 \text{ mm}$  pro řemenici hnanou. Počty zubů  $z1=18$  a  $z2=60$ . Řemen byl zvolen PU – 10T2.5-0277.5 s profilem T2,5, délkou 277,50 mm a šířkou 10mm. (šířku řemene bude nutno upravit za pomoci skalpelu dle hnací řemenice). Na Obr. 15 lze vidět sestavu osy Y vytvořenou v programu Autodesk Inventor.



Obr. 15: Sestava pohonu v ose Y

### **Řemenový převod mezi motorem a pojezdovým ústrojím v ose Z**

Převod ozubeným řemenem pro osu Z je totožný jako navrhovaný převod pro osy X a Y, včetně totožných hodnot rozměrů řemenic a řemenů jako u osy X. Na Obr. 16 lze vidět sestavu osy Z, toto ústrojí slouží k polohování pinoly ve směru osy Z.



*Obr. 16: Sestava pohonu v ose Z*

## 5.2 Krokové motory Microcon SX17-1005LQCEF

Srdcem celé pohonné soustavy byly navrženy krokové synchronní bipolární motory s označením SX17-1005LQCEF. Tyto krokové motory byly pro návrh pohonu varianty A zvoleny jako optimální, na základě odborného odhadu.

Bipolární motory mají zpravidla čtyři vývody. Tyto motory přeměňují elektrickou energii v mechanickou práci a fungují na principech využívání silových účinků magnetického pole. Krokový motor se skládá ze dvou hlavních částí – statoru a rotoru. Stator, statická součást motoru, je vyroben z ocelových lamel, které jsou opatřeny měděnými vinutími. U bipolárních motorů je nutné polaritu napětí na těchto vinutích měnit za pomoci tzv. H-můstku.

Ovládání motoru lze realizovat dvěma způsoby - jednofázově a dvoufázově. Při jednofázovém ovládání dochází k buzení jen jedné fáze a motor odebírá ze zdroje méně proudu. Dvoufázové ovládání budí současně dvě fáze, odebírá více proudu, avšak jeho moment, nebo-li síla je úměrně větší.

U krokových motorů lze dosáhnout k výraznému zjemnění kroků a to zejména díky tzv. mikrokrokování. Mikrokrokování funguje na principu kombinace jednofázového a dvoufázového buzení. Nejprve dojde k vybuzení jedné fáze a nastavení zubů rotoru proti vybuzenému pólu, dále dojde k vybuzení druhé fáze a zuby rotoru se díky tomu nastaví do geometrického středu mezi oba vybuzené póly. Po těchto úkonech dojde k vypnutí první vybuzené fáze, čímž dojde k natočení zubů rotoru proti druhému vybuzenému pólu. U některých obvodů lze realizovat mezi dvěma póly mnohem více mikrokroků 8, 16, 32, 64, 128. Toto mikrokrokování je realizováno pomocí PWM, čehož je využito i u driveru DRV8825. PWM znamená v překladu pulsně šířková modulace. [18]

Hodnoty motoru Microcon SX17-1005LQCEF jsou následující – Statický moment: 0,52 Nm, příruba: Nema 17, jmenovitý proud: 1A, hmotnost: 0,3 kg.

### 5.3 Bezpečnostní indukční snímače polohy

Vzhledem k tomu, že některé pohyblivé se komponenty na SMS jsou velmi náchylné na jakékoliv rázy, zejména dotyková sonda, je nutné dbát na jejich bezpečnost a bezpečnost celého stroje. Z tohoto důvodu je žádoucí stroj vybavit soustavou indukčních snímačů polohy, které budou rozmístěny na koncích všech pojezdových os. V okamžiku, kdy se např. mostová konstrukce přiblíží ke spínané poloze snímače v ose Y, dojde k okamžitému zastavení motorů. Díky tomu budou pohyblivé komponenty stroje chráněny proti nárazu, který by mohl být způsoben neopatrnou manipulací obsluhy nebo neočekávanou poruchou některé z částí pohonného systému.

Indukční snímače polohy fungují na principu změny indukčnosti tlumivky na základě změny magnetické vodivosti magnetického obvodu. Vlivem změny indukčnosti cívky nastává také změna její impedance při napájení střídavým proudem a právě tato změna je měřitelná. Na Obr. 17 je znázorněno čidlo LJ12A3-4 Z/BY s detekční vzdáleností 0-4 mm, které je navrženo využít ve variantě A. [19]



*Obr. 17: Indukční snímač polohy*

## 5.4 Řídicí komponenty Arduino

Pro řízení os SMS byla vybrána otevřená, elektronická, programovatelná platforma nazývaná Arduino. Arduino je založeno na vývojovém prostředí využívající programovací jazyk Arduino a software IDE a dále na hardwaru sestávajícího z jednoduché počítačové desky. Tato platforma oplývá snadným uživatelským ovládáním, schopností spolupracovat s většinou domácích operačních systémů, nepřeberným množstvím kompatibilních shieldů a zejména na nízkých pořizovacích nákladech. [20]

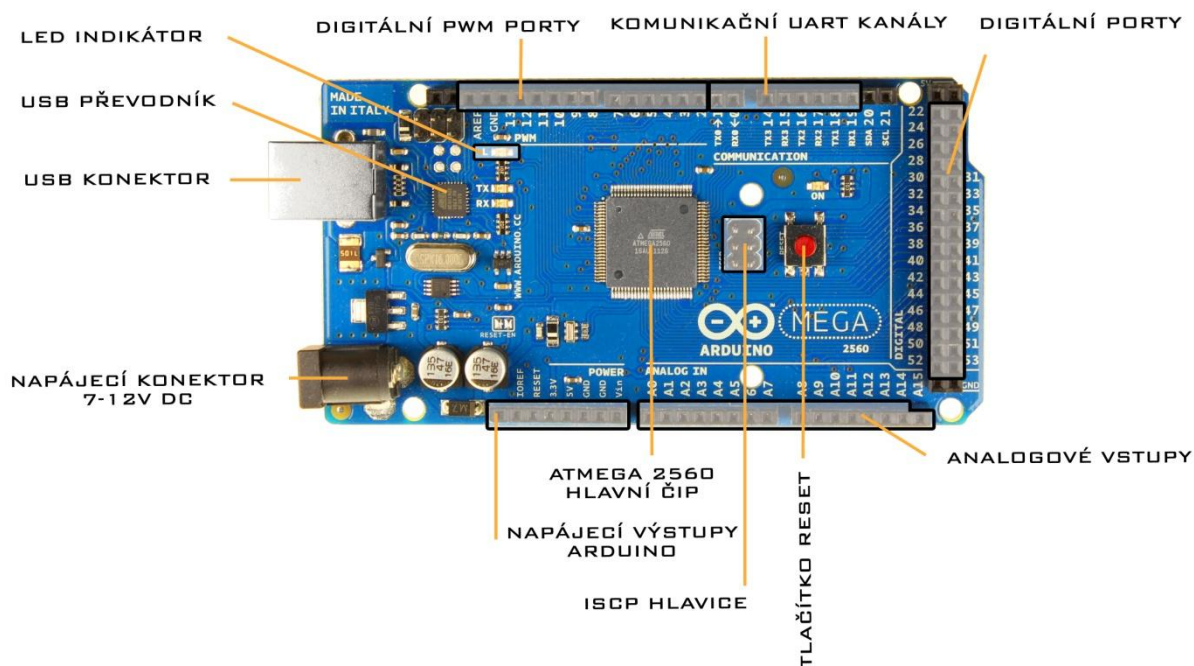
Programovatelná platforma začala vznikat již v roce 2003 v Italském městě Ivrea na tamějším vzdělávacím institutu, kdy se o vytvoření prototypu úspěšně pokoušel Kolumbijský student Hernando Barragán v rámci své magisterské práce. O další rozvoj této jednoduché vývojové platformy již s názvem Arduino, která měla nalézt největší užitek zejména u studentů, se postarala skupina okolo Massimo Banziho (supervizora magisterské práce Hernanda Barragána) a David Cuartiellese. Po několika letech vývoje došlo k vyčerpání finančních prostředků jdoucích na projekt platformy Arduino, což mohlo mít za následek ukončení projektu. Právě v tu dobu došlo k rozhodnutí celé fakulty pracující na tomto projektu, poskytnout platformu jako Open Source široké veřejnosti.

Název Arduino je inspirován jedním z Italských králů jménem Arduin vládnoucím v roce 1002, na jehož počest byla ve městě Ivrea založena hospoda se jménem Bar Di Re Arduino a právě v tomto baru byly položeny kořeny současné platformy Arduino. [21][22]

### 5.4.1 Arduino AtMega 2560

Arduino AtMega 2560 je mikrokontrolerová deska postavená na základech ATmega2560. Tato deska obsahuje 54 digitálních vstupů/výstupů. Arduino Mega 2560 vzniklo zvětšením desky s názvem Arduino Uno. Díky modifikacím byla tato deska obohacena o větší počet pinů a také byla navýšena kapacita operační paměti. Toto vše je využíváno zejména, pokud je zapotřebí většího výpočetního výkonu. V případě realizace pohonu SMS se stala deska AtMega jasnou volbou - z důvodu velkého počtu pinů, neboť veškeré shieldy, které budou k této desce připojeny, si žádají velké množství volných portů.

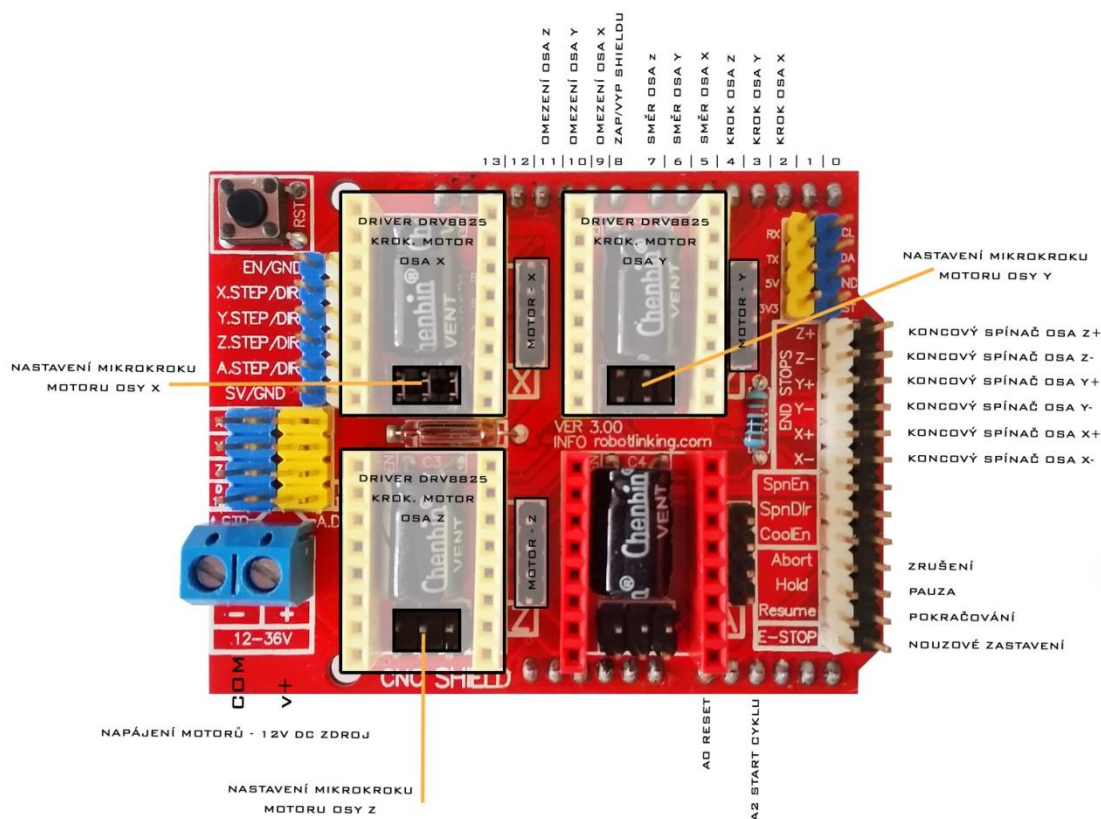
Na Obr. 18 lze vidět desku Arduino Mega 2560 včetně rozložení pinů. Propojení s počítačem a přenos programu z IDE softwaru obstarává USB konektor. Při propojení s PC slouží zároveň jako napájení celé desky. Doporučeným napájením desky je rozsah napětí mezi 7 – 12V. Zajímavostí Arduina je vratná pojistka, která chrání PC, jenž je pomocí USB portu připojen k Arduino. V případě, kdy se do USB dostane hodnota proudu vyšší než 500mA, dojde k okamžitému přerušení programu mezi PC a Arduino kartou.



Obr. 18: Rozložení pinů na desce Arduino Mega 2560

### 5.4.2 3D CNC Shield V3 Printer Expansion Board

Velmi zajímavým shieldem, produkovaným pro platformu Arduino, je CNC deska. Tato deska je vhodná zejména pro využití v 3D tiskárnách a jednodušších CNC obráběcích strojích. Vzhledem k určitým podobnostem, mezi 3D tiskárnami a SMS Somet, byl tento shield zvolen jako optimální řešení nabízející jednoduché připojení součástí jako jsou motory, koncové snímače a nouzové stop tlačítko. V okamžiku absence tohoto shieldu, v celé navrhované soustavě pohonu, by bylo nutné veškeré piny ručně připojovat za pomoci nepájivého pole, což by vedlo k výraznému znehlednění sestavy. Jak lze vidět na Obr. 19, deska umožňuje připojení napájení v rozsahu 12-36V. Na tomto obrázku je dále naznačeno rozložení veškerých pinů.



Obr. 19: Rozložení pinů na 3D CNC Shieldu pro Arduino



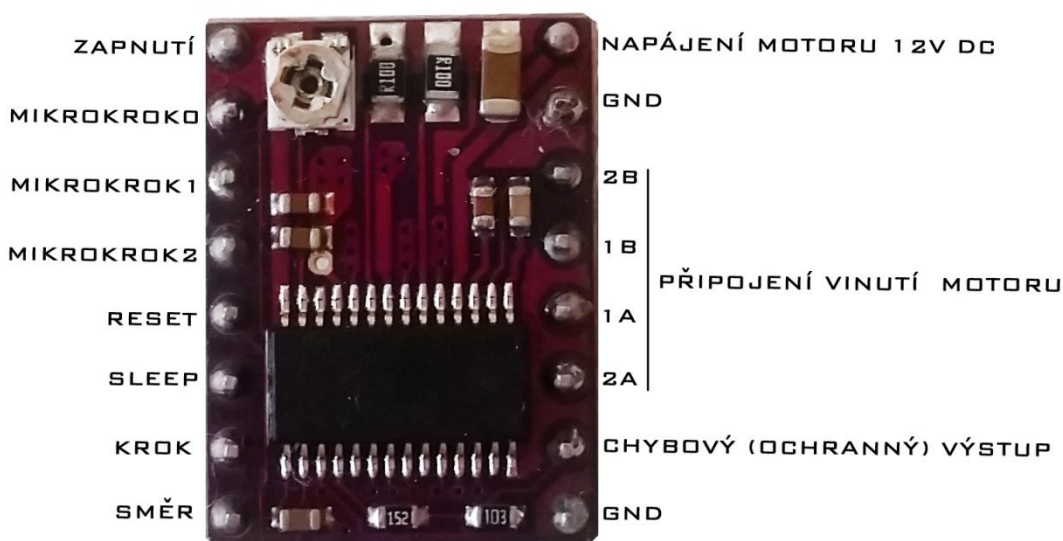
### 5.4.3 Arduino motor driver DRV8825

Tento driver je určený pro bipolární krokové motory a je možné ho napájet až 2,2A při použití dodávaného hliníkového chladiče. Driver je vybaven nadproudovou ochranou a ochranou proti přehřátí.

Dalším jeho velkým kladem je nastavení mikrokrokování, kdy je možné standardní krok dělit šesti různými mikrokroky za použití tzv. jumperu, z čehož nejjemnější krok, lze realizovat až v max. poměru 1/32. Napájecí napětí driveru DRV8825 je od 8,2V – 45V. Na Obr. 20 lze vidět rozložení pinů na driveru. Jeho rozměry jsou 20x15,2mm a lze ho bez problému namontovat přímo do CNC shieldu využitého v této variantě návrhu pohonu. Mikrokrokování u verze DRV8825 je zobrazeno v Tab. 1. [23]

*Tabulka 1: Mikrokrokování driveru DRV8825*

Jumper 0	Jumper 1	Jumper 2	Rozlišení kroku
NE	NE	NE	plný krok
umístěn	NE	NE	poloviční krok
NE	umístěn	NE	1/4 krok
umístěn	umístěn	NE	1/8 krok
NE	NE	umístěn	1/16 krok
umístěn	NE	umístěn	1/32 krok

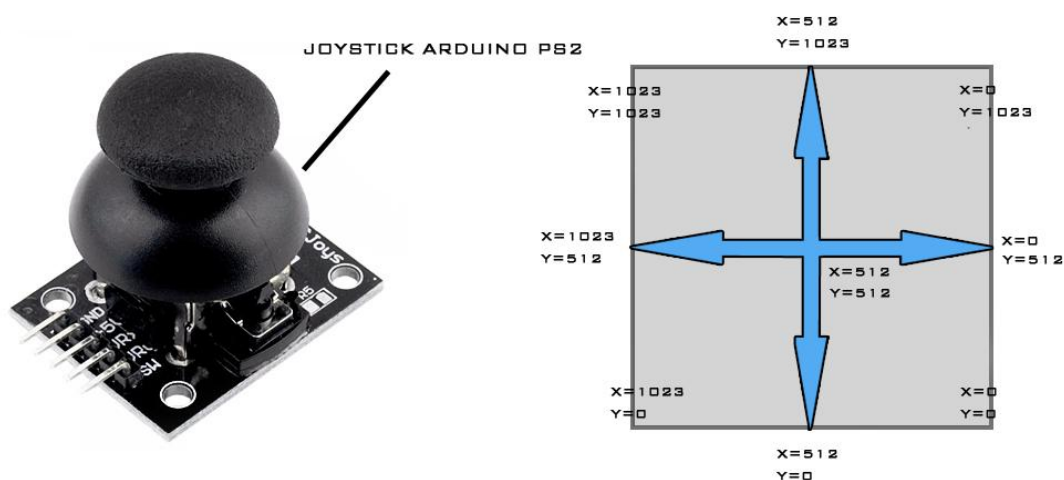


*Obr. 20: Rozložení pinů na driveru DRV8825*

#### 5.4.4 Joystick PS2

Zařízení sloužící pro ovládání krokových motorů je joystick PS2 Arduino. Tento joystick, napodobující funkce známého ovladače PS2 využívaného v herním průmyslu, umožňuje snímat pohyby ve dvou osách za pomoci naklápění herní páčky. Joystick je tvořen dvěma deseti-kiloohmovými potenciometry a jedním tlačítkem. Potenciometr je v klidovém režimu nastaven přibližně do poloviny svého rozsahu, přičemž při pohybu polohovací páčkou nabývá hodnot od 0 do 10 kiloohmů. Z desky joysticku vychází pět pinů, a to: GND, +5V, VRx, VRy a SW. Rozložení pinů lze vidět na Obr. 21. Přičemž VRx a VRy jsou piny analogové a SW je pin digitální. GND je pin určený pro uzemnění shieldu a +5V označuje pin napájecí.

Rozsah, ve kterém se pohybuje analogový vstup pro jednotlivé osy, je roven přibližně hodnotám 0-1023. Tyto hodnoty jsou nejlépe vidět na Obr. 21, ve kterém jsou vyobrazeny krajní pozice pro jednotlivé osy.



*Obr. 21: Arduino Joystick PS2 a jeho mapování souřadnic*

## 5.5 Studie designu krytu ovladače

Vzhledem k faktu, že se řízení a ovládání pohonu skládá z většího počtu komponentů tvořících jeden funkční celek, je nutné vytvořit pro jejich bezpečné uložení vhodný ergonomický obal.

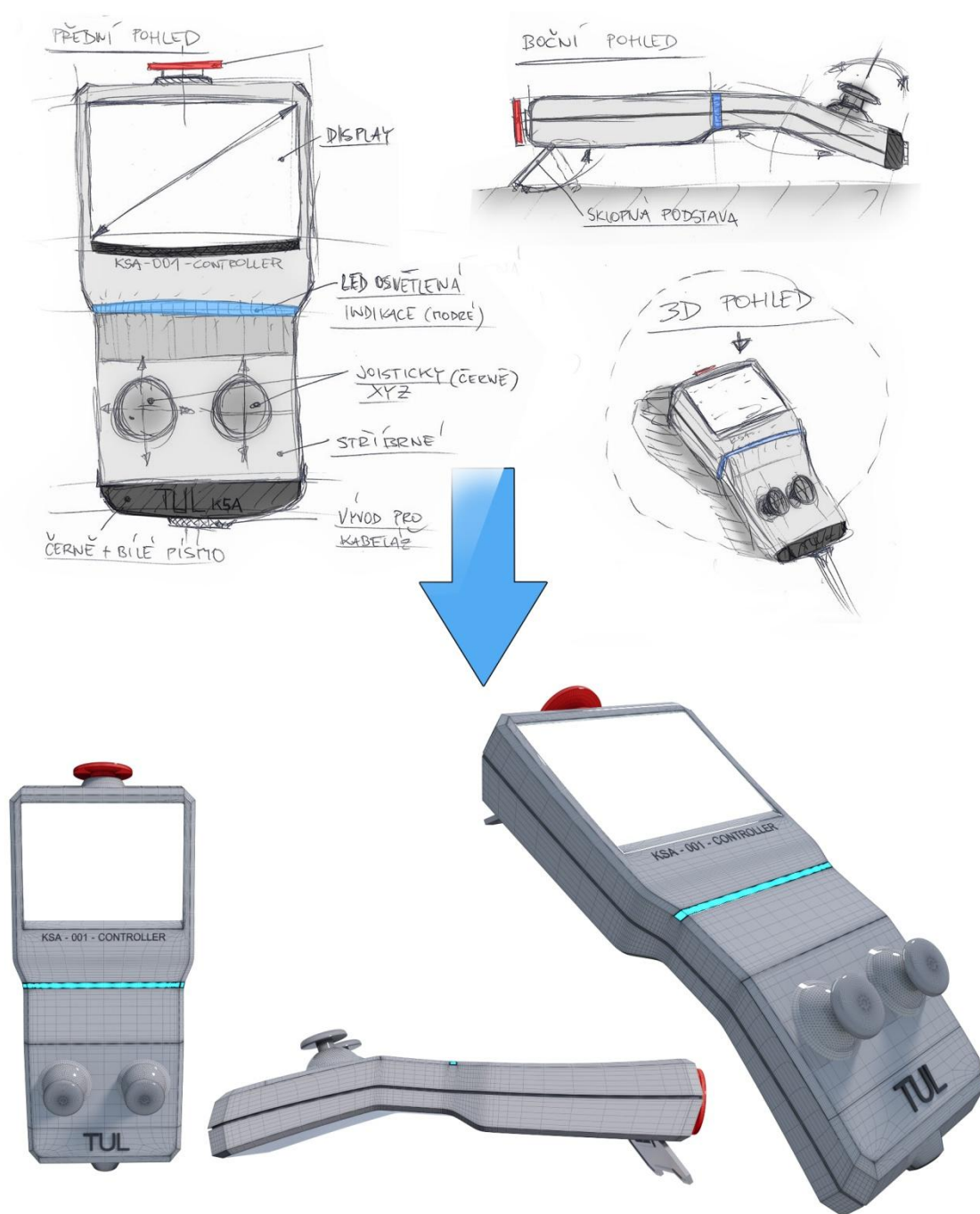
Tento obal musí být koncipován s ohledem na:

- bezpečnost obsluhy zařízení (z důvodu působení elektrického proudu uvnitř obvodů),
- ochranu jemných komponentů náchylných na neodbornou manipulaci (z důvodu ergonomie práce),
- konstrukční a funkční vlastnosti celého modulu.

Na základě těchto několika kritérií bylo nutné navrhnout funkční zakrytování komponent. Kryt bylo nutné prostorově navrhnout pro uložení Arduino desky, CNC shieldu s drivery pro krokové motory a kabeláže. Na horní straně musí kontroler obsahovat výstupy pro umístění joysticků ovládajících polohování stroje v osách XYZ a nouzové stop tlačítko, které je z bezpečnostního hlediska nepostradatelnou součástí. V budoucnu je možné počítat s modifikací v podobě zabudování 3,2 palcového TFT display, který by mohl zobrazovat aktuální souřadnice polohy a další užitečné informace.

Komerčně produkováné joysticky, které nabízejí renomovaní výrobci přímo ke svým řídicím systémům, se cenově pohybují řádově od 20 000 Kč výše. V případě této studie ovladače je počítáno s mnohonásobně nižší částkou, která se odvíjí zejména podle druhu použité technologie pro výrobu zakrytování. Jelikož jde ale o prototyp, nejvhodnější technologií je vytištění součástí na 3D tiskárně.

Výsledné skici a 3D studie ovládače pro SMS, které lze vidět na Obr. 22, byly vytvořeny originálně pro soustavu Arduino a mohou být výchozím podkladem pro další zpracování v CAD softwaru.



Obr. 22: Studie kontroleru

## 6 Návrh řešení - varianta B

Původním plánem bylo plně propojit software Tango!3D s řídicím systémem krokových motorů tak, že by stroj fungoval na plně automatickém principu. Po prvním ručním „naťukání“ měřené součásti za pomoci kontroleru by došlo k uložení cest do paměti. Další měření dílů ze stejné série by bylo prováděno již automaticky za využití tohoto CNC programu. Na tomto principu fungují i nejmodernější profesionální stroje. V průběhu plánování bylo ovšem zjištěno, že kompatibilita softwaru Tango!3D a Arduino není podporována. Proto bylo žádoucí navrhnout i druhou variantu přestavby SMS.

Ve variantě B bylo počítáno s plně profesionálními DC servomotory s tachim. Tyto servomotory by bylo poté možné řídit ve všech 3 osách za pomoci kontroleru se speciálním joystickem. Na trhu je nabízeno několik variant a možností, které jsou dělené dle náročnosti aplikací, pro které je SMS plánován využívat. Z obsáhlé nabídky, která se na trhu nachází, byly vybrány následující varianty od třech výrobců. Všechny tyto varianty plně splňují stanovené podmínky a zároveň jsou kompatibilní se stávajícím hardwarem a softwarem SMS, jak udává jeden z dodavatelů měřicích strojů – firma Topmes. [24]

Nutno ovšem podotknout, že tito výrobci provádí modernizaci SMS pouze na strojích, které byly již od své výroby osazeny motory pro polohování jednotlivých os. S celkovou přestavbou ručního SMS na plně automatický se podle informací nesetkávají.

## 6.1 Pantec Eagle basic

Prvním řešením řízení os SMS ve variantě B je využití kontroleru Eagle od firmy Pantec. Kontrolery Pantec Eagle se dále dělí na několik dalších podkategorií dle aplikací, pro které jsou určeny. Pro návrh pohonu do stroje Somet Berox je plně dostačující varianta basic, která je vhodným řešením pro všechny druhy standardních aplikací a zároveň je vhodná pro všechny typy SMS. Díky širokému rozsahu umožňuje připojení a řízení skenovacích, dotykových, laserových a vícesenzorových snímačů. [25]



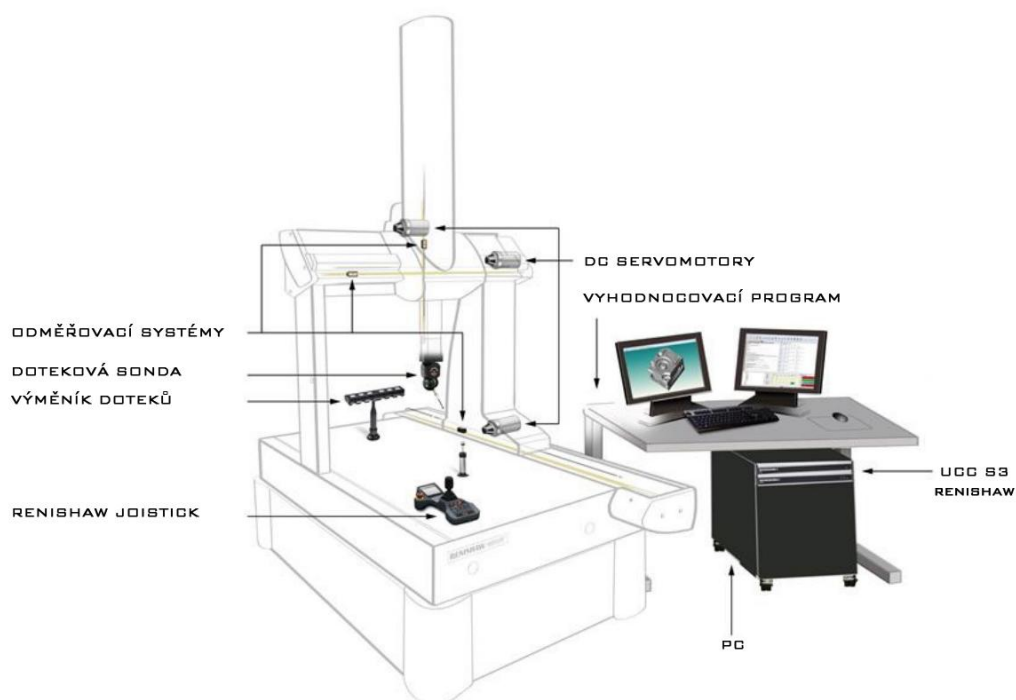
*Obr. 23: Sestava Pantec Eagle basic*

Zdroj: [25]

## 6.2 Renishaw UCC S3 kontroler

Jedná se o univerzální systém, určený pro automatizované, 3-osé, dotekové měřicí stroje. Toto řešení je vhodné pro velikostně menší i střední SMS a je ideální volbou pro již částečně modifikovaný stroj Somet, který byl již částečně osazen měřicími komponenty firmy Renishaw. Tuto možnou kompletní sestavu obsahující tři elektromotory, tři odměřovací zařízení, dotykovou sondu, měřicí software, ovládač, SPA3 zesilovač a kontroler UCC S3 propojený s PC lze vidět na Obr. 24.

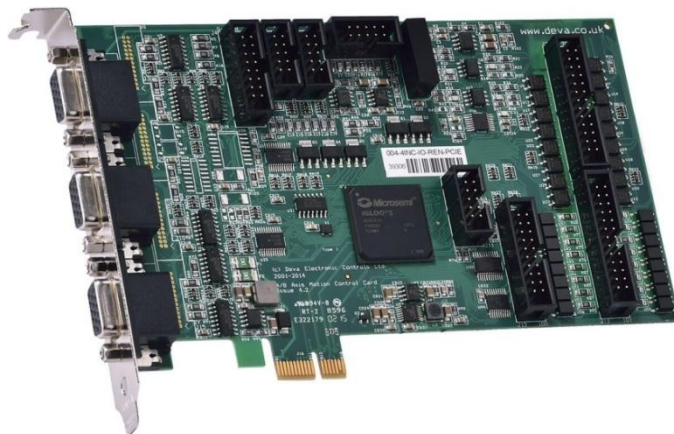
Vzhledem k tomu, že SMS Somet je nyní řešen jako ručně polohovatelný, je nutné pořídit do této sestavy zcela nové DC servomotory. Cena za tři kusy se pohybuje okolo 30 000 Kč bez DPH, cena za set Renishaw UCC S3 + SPA3 + ruční Joystick MCULite – 2 se pohybuje v přepočtu okolo 190 000 Kč bez DPH. Výhodou celého řešení je 100% zajištění technického poradenství a nonstop podpora servisního technika. Výsledná cena za realizaci celé této sestavy se může tedy vyšplhat na více než 220 000 Kč. [26]



*Obr. 24: Měřicí sestava od společnosti Renishaw*

### 6.3 Deva CMM System pack solution

U společnosti Deva je možné zakoupení celé sestavy obsahující 4-osý PCI Express CMM kontroler, 4-osý Servo Amplifier a Colour Touchscreen Joystick. Deva karty jsou navrženy pro širokou škálu měřicích a pohybových aplikací, ať už pro SMS, nebo také pro využití v robotice, či u CNC strojů. Karta podporuje rozhraní PCIe, PCI a ISA Bus sběrnice. Cena za sestavu se pohybuje v přepočtu kolem 150 000 Kč. [27]



*Obr. 25: Ukázka Deva karty*

Zdroj: [27]

## 7 Porovnání variant

Dle zadání diplomové práce byly vyhotoveny dvě zcela odlišné varianty návrhu pohonného systému pro SMS Somet Berox. Varianta A – kdy je soustava krokových motorů řízena za pomoci programovatelné platformy Arduino a varianta B – kdy se o řízení servo motorů stará jeden z navrhovaných komerčních řídicích kontrolerů, jako je Pantec, Renishaw, či Deva. Z těchto výše vypracovaných variant bylo nutné vybrat tu vhodnější, která by co možná nejlépe odpovídala veškerým požadavkům.

### 7.1 Soupis požadavků na pohon pro SMS

Pro objektivnější vyhodnocení nejlepší varianty byl vyhotoven soupis požadavků (kritérií), jaké atributy by měl pohonný systém splňovat a co je od něho očekáváno.

Jedná se zejména o tyto požadavky a kritéria:

- Šetrnost montáže – jak již bylo řečeno v úvodu práce, nevhodné montážní a jiné úkony nesmí narušit funkčnost stroje. Z tohoto důvodu je nutné pro návrh a realizaci pohonu SMS vybrat takové technologie, které je možné aplikovat na stávající konstrukci bez nutnosti obsáhlejších zásahů do celé soustavy.
- Technologie výroby – při konstrukci nového pohonu SMS je nutno některé z plánovaných komponentů vyrobit z dostupných zdrojů katedry. Z tohoto důvodu je nutné zaměřit se na tyto technologické možnosti s ohledem na strojový park KSA. Tento bod slouží zejména k úspoře nákladů vynaložených na celý projekt návrhu pohonu SMS.
- Pořizovací náklady – vzhledem k faktu, že přestavba SMS Somet Berox je realizována čistě jako záležitost katedry výrobních systémů a automatizace na TUL, jsou finanční prostředky vynaložené na tento projekt značně omezené. Z tohoto důvodu je nutné tomuto kritériu přikládat největší váhu.



- Modifikovatelnost – ačkoliv by se mohlo zdát, že tento bod není zcela vhodný pro profesionální využití stroje, opak může být pravdou. Hlavním účelem SMS Somet Berox jsou zejména výukové účely pro studenty TUL FS. Z tohoto důvodu může být tento bod považován za užitečný. Profesionální řešení SMS není možné dále modifikovat ani upravovat, zejména z důvodu možné ztráty záruky a servisu. Takové problémy ovšem nehrozí u platformy Arduino, jenž je navržena za účelem vlastního programování a projektování.
- Schopnost opakovaného měření z CNC programu – schopnost opakovatelnosti měření z uloženého CNC kódu je u moderních SMS zcela zásadní a je obsažena v každém motorizovaném SMS. Toto kritérium není důležité při měření na SMS v řádu jednotek kusů, nýbrž při měření větších sérií, kdy neustálá ruční manipulace se SMS může být nepříjemně zdloouvá.

## 7.2 Vícekriteriální rozhodování

Na základě výše sepsaných požadavků bylo nutné vybrat nejvhodnější variantu. Vzhledem k nutnosti výběru správného posouzení byla sepsána úloha tzv. vícekriteriálního rozhodování. Výsledkem této úlohy je stanovení jasných rozhodnutí, tedy výběr neoptimálnější varianty ze dvou navrhovaných. Nejprve je nutné zvolit tzv. rozhodovatele, neboli subjekt, který má za úkol učinit rozhodnutí. Dalším krokem je vypsání kritérií. V tomto případě označena jako K1-6, jedná se o hlediska, dle kterých jsou varianty posuzovány.

Metodou pro stanovení vah kritérií byla vybrána metoda bodovací. Tato metoda vychází z ohodnocení důležitosti kritérií určitým počtem bodů. V případě alokace 100 bodů se jedná o tzv. Metfesselovu alokaci, kdy se mezi jednotlivá kritéria rozdělí 100 bodů (čím důležitější kritérium, tím větší bodové ohodnocení).

Toto bodové ohodnocení s vypočtenými vahami lze vidět v Tab. 2, kdy rozdělení bodů bylo vytvořeno na základě kvalifikovaného odhadu. [28]

*Tabulka 2: Bodové ohodnocení*

Kritérium	Počet bodů	Váha
K <sub>1</sub> - Šetrnost montáže	10	0,1
K <sub>2</sub> - Modifikovatelnost	20	0,2
K <sub>3</sub> - Opakovatelnost	20	0,2
K <sub>4</sub> - Náklady	30	0,3
K <sub>5</sub> - Technologie	10	0,1
K <sub>6</sub> - Servis	10	0,1
Celkem	100	1

Další fází vedoucí k úspěšnému výsledku je výběr metody stanovení pořadí variant. V tomto případě došlo k vybrání tzv. Metody pořadí, která je založena na transformaci kritériální matice na matici pořadí. Jde tedy o postupné přiřazování pořadí k oběma variantám postupně u všech kritérií. Tyto pořadí (Výhra – zelená buňka = 2 body, prohra – červená buňka = 1 bod) se dále převedou na váhy zanesené v Tab. 3, z čehož se určí výsledné pořadí. Úspěšnější variantou je varianta s vyšší hodnotou váženého součtu pořadí. Metoda pořadí je zanesena v Tab. 3, kde hodnoty ve sloupcích  $K_{(n)}$  vyjadřují váhy v závislosti na pořadí v daném kritériu. [28]

*Tabulka 3: Metoda pořadí*

Varianta	K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>	K <sub>3</sub>	K <sub>4</sub>	K <sub>5</sub>	K <sub>6</sub>	Vážený součet pořadí	Pořadí
Varianta A	0,2	0,4	0,2	0,6	0,2	0,1	1,7	1.
Varianta B	0,1	0,2	0,4	0,3	0,1	0,2	1,3	2.
Váhy	0,1	0,2	0,2	0,3	0,1	0,1		

Jak lze vidět v Tab. 3, hodnota váženého součtu pořadí je u Varianty A o 0,4 vyšší, než u Varianty B. Vyšší hodnota je v tomto případě tou optimálnější.

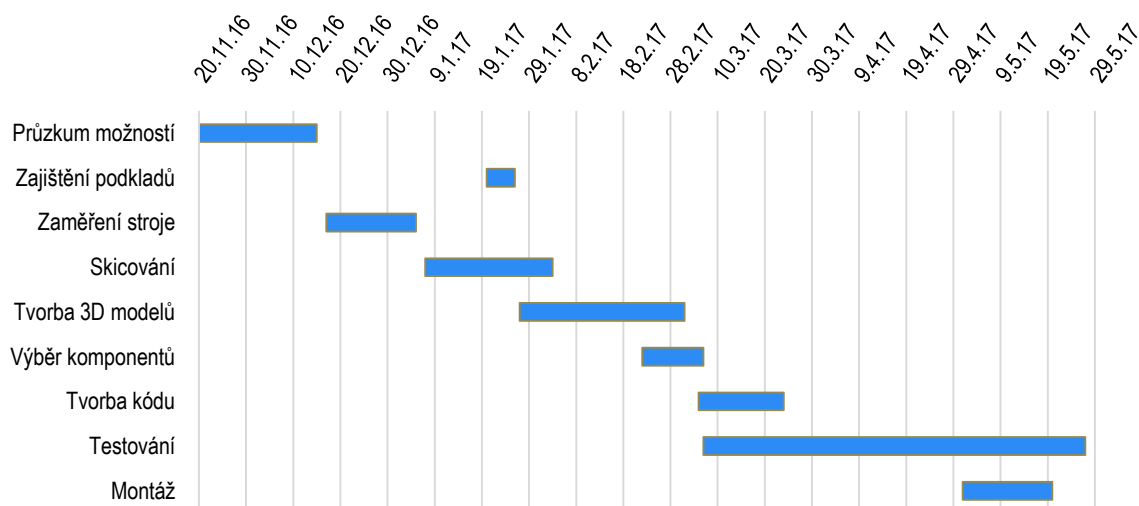
Výsledkem tohoto vícekritériálního hodnocení variant na návrh pohonu SMS je tedy výběr varianty A – tedy realizaci za pomoci krokových motorů řízených platformou Arduino.

## 8 Realizace varianty A

Vzhledem k nedostatku času bylo nutné celou realizaci pohonu SMS provést v co nejkratším možném čase. Z tohoto důvodu bylo nutné veškeré operace, konstrukci, nákup součástí a výrobu komponent, obezřetně naplánovat. Jakékoliv neočekávané problémy by mohly vyústit v nedodržení stanoveného termínu pro vyhotovení funkčního návrhu pohonu souřadnicového měřicího stroje Somet Berox. V následujících podkapitolách jsou nastíněny postupy prací, které byly vykonávány dle naplánovaného harmonogramu znázorněného v Gantově diagramu označeném jako Tab. 4 a Graf 1.

*Tabulka 4: Harmonogram prací*

DETAIL PROJEKTU			TRVÁNÍ (DNŮ)
OD	DO	ČINNOST	
20.11.16	15.12.16	Průzkum možností	25
20.1.17	26.1.17	Zajištění podkladů	6
17.12.16	6.1.17	Zaměření stroje	19
7.1.17	4.2.17	Skicování	27
27.1.17	2.3.17	Tvorba 3D modelů	35
22.2.17	5.3.17	Výběr komponentů	13
6.3.17	24.3.17	Tvorba kódu	18
7.3.17	28.5.17	Testování	81
1.5.17	20.5.17	Přípravné práce/Montáž	19



*Graf 1: Časová osa plánovaných prací*

## 8.1 Tvorba 3D modelů – konstrukční práce

Nedílnou součástí konstrukčních prací bylo využívání CAD softwaru Autodesk Inventor, ve kterém byly vytvářeny jednotlivé díly a dále sestavy všech tří os stroje na základě provedených měření na SMS Somet Berox a pořízených fotografií výkresové dokumentace jedné z variant Beroxu. Tvorba CAD modelů byla podmíněna řadou omezení týkajících se zejména minimálních zástavbových prostorů, nemožnosti demontáže valné většiny komponentů a omezeností mechanických zásahů do konstrukce stroje. Jedinou možností bylo tedy vycházet z uchycení demontovaných komponent mikroposuvu a několika dalších demontovaných součástí, čímž byla celá konstrukce značně ovlivněna.

Při konstruování součástí bylo nutné ihned v samotném úvodu uvažovat nad výrobními možnostmi a strojovým vybavením katedry KSA, ale také nad usnadněním budoucí montáže komponentů na měřicím stroji. Tyto úvahy úzce souvisí s metodami navrhování komponentů nazývanými se DFM – design for manufacturability a DFA – design for assembly. Hlavním úkolem těchto metod je minimalizace nákladů.

- DFA – jedná se o metodu, při kterém jsou produkty navrhovány s ohledem na snadnou montáž. Dílčími výsledky DFA jsou minimalizace počtu dílů sestavy, snadnější montáž a jednodušší manipulace s díly. Tyto dílčí výsledky vedou zejména ke snížení nákladů vynaložených na montáž komponentů.
- DFM – jde o navrhování součástí s ohledem na jejich snadnou výrobu. Jedná se zejména o volbu nejvhodnějších materiálů a výrobních procesů. Výsledkem této činnosti je zredukování výrobních nákladů komponentů. [29]

Detailnější popis navrhovaných komponentů lze vidět v kapitole 5.1 a dále ve výkresové dokumentaci v příloze č. 1 a č. 2.

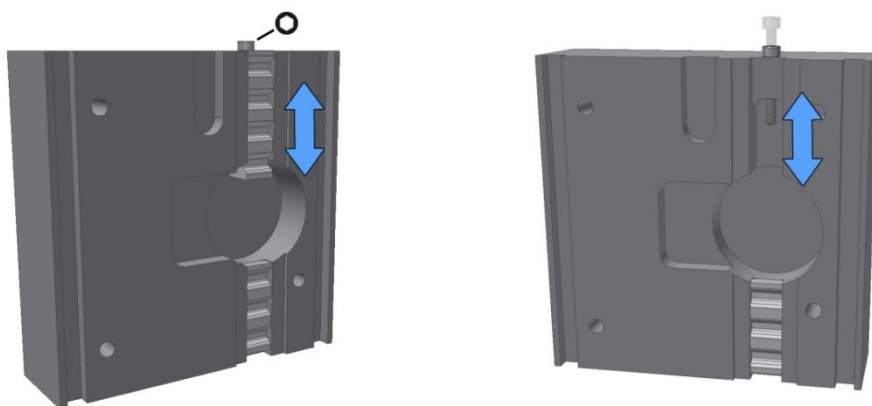
Na následujícím Obr. 26 lze vidět jednu ze součástí navrhovaných s ohledem na snadnou výrobu a montáž na SMS. Tento držák motoru v ose Z je tvořen třemi různými díly, které jsou svařeny za pomoci metody TIG do výsledného svařence. Pro výrobu tohoto komponentu byla tedy využita pouze technologie laserového pálení na CNC laserovém pálicím stroji a následné svaření za pomoci svařovacího inventuru.

Otvory označené modrou barvou na Obr. 26 byly při návrhu součásti vytvořeny z důvodu snadné přístupnosti nástrojů při montáži šroubového spojení držáku motoru a motoru samotného. Díky těmto otvorům není nutné tedy nikterak upravovat montážní nářadí ani konstruovat speciální přípravky.



*Obr. 26: Držák motoru osy Z s prolnutím DFA*

Další upravenou součástí, která byla v návrhu využita jako upínací prvek rozvodného ozubeného řemene v ose Z, byl prvek sloužící jako protizávaží pinoly. Ukázku navržené úpravy modelu závaží lze vidět na Obr. 27. Výkres aktuálně upravené součásti lze vidět v příloze č. 4.



*Obr. 27: Návrh úpravy součásti pro napínání řemene v ose Z*

## 8.2 Nákup komponentů

Poměrnou část součástí potřebnou pro montáž nového pohonného systému bylo nutné nakoupit u specializovaných prodejců. Mezi nakoupené položky patří veškeré komponenty platformy Arduino, ozubené řemenice a řemeny, motory a zdroj. Nákup těchto komponentů bylo nutno realizovat s dostatečným předstihem, neboť ne vždy byly veškeré položky ihned dostupné skladem a bylo na ně tedy nutné vyčkat mnohdy i několik týdnů. V následující Tab. 5 jsou zaznamenány veškeré pořízené komponenty a finanční náklady vynaložené na jejich pořízení. V tomto finančním zhodnocení nejsou započítány výrobní, ani materiálové náklady, jelikož byly realizovány z vlastních zdrojů autora práce.

*Tabulka 5: Soupis finančních nákladů*

Produkt	Počet Ks.	Cena za 1 Ks.	Cena
Arduino Mega 2560	1	388,00 Kč	388,00 Kč
CNC Shield	1	139,00 Kč	139,00 Kč
Driver DRV8825	3	99,00 Kč	396,00 Kč
Nepájivé pole	1	118,00 Kč	118,00 Kč
Vodiče	2	92,00 Kč	184,00 Kč
LED Dioda	6	2,00 Kč	12,00 Kč
Rezistor	18	1,00 Kč	18,00 Kč
Joystick PS2 analog	2	87,00 Kč	174,00 Kč
Indukční polohové čidlo	6	140,00 Kč	840,00 Kč
Krokový motor Nema 17	2	299,00 Kč	598,00 Kč
Krokový motor Nema 23	1	399,00 Kč	399,00 Kč
Ozubená řemenice D35,02	4	81,70 Kč	326,80 Kč
Ozubená řemenice D30,25	2	68,40 Kč	136,80 Kč
Ozubená řemenice D14,32	3	64,00 Kč	192,00 Kč
Ozubená řemenice D47,75	3	104,50 Kč	313,50 Kč
Nekonečný oz. řemen 230	2	171,30 Kč	342,60 Kč
Nekonečný oz. řemen	1	385,50 Kč	385,50 Kč
Konečný oz. řemen	5	159,30 Kč	796,50 Kč
Zdroj napětí	1	0,00 Kč	0,00 Kč
Cena celkem			5 759,70 Kč

### 8.3 Demontáž nepotřebných komponentů

Jednou z prvních věcí, které bylo nutné provést přímo na SMS, bylo odstranění ochranného zakrytování stroje. Nejdůležitější demontážní činností bylo odstranění stávajících planetových převodových zařízení sloužících pro mikroposuv os XYZ. Tyto převodovky bylo vzhledem k jejich stáří velice pracné demontovat, ať už kvůli nemožnosti použít hrubou sílu, ale také z důvodu kompletního vyschnutí mazacích přípravků, které byly aplikovány před mnoha lety z důvodu plynulejšího chodu stroje. Tato převodová ústrojí bylo nutné demontovat ve všech třech osách a stejně tak na ně navazující napínací kladky, které sloužily k napínání plechových pásků.

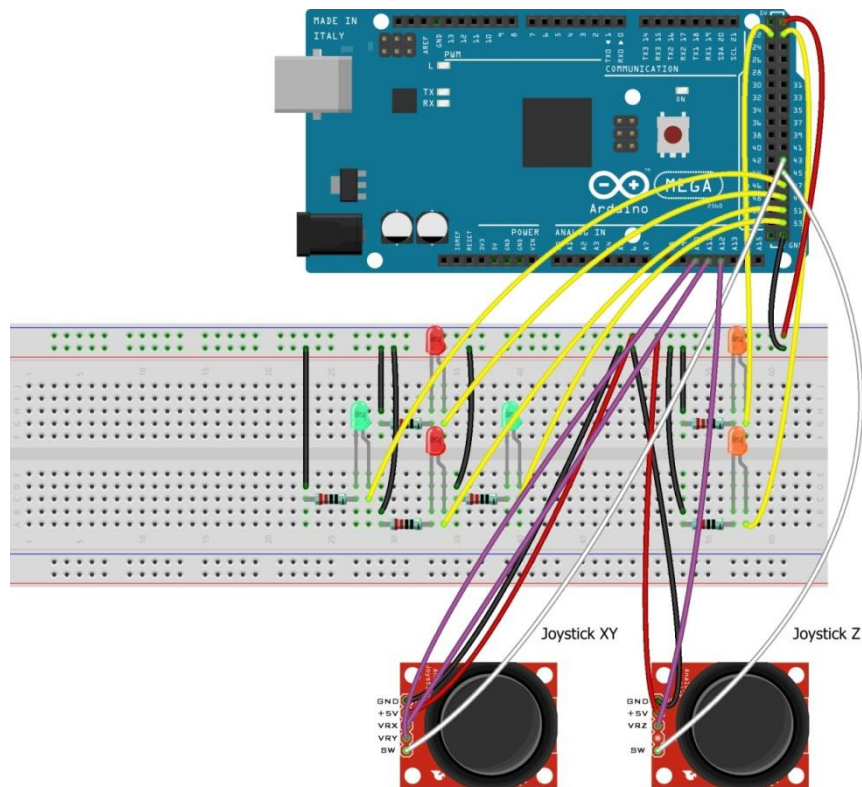
### 8.4 Softwarové propojení

Jedním z největších úskalí, jak se ukázalo, bylo naprogramování komunikace Arduina s řízením a ovládáním motorů. Původně uvažovanou variantu, ve které by měl celou soustavu pohonů ovládat PS2 kontroler za pomoci bezdrátového bluetooth shieldu bylo nutné zavrhnout. Po množství pokusů o propojení Arduina, motorů a herního PS2 kontroleru se dospělo k závěru, že není možné takové řešení nyní vyhotovit – východiskem by bylo vytvoření vlastního komunikačního firmwaru, což ovšem vystupuje nad rámec této diplomové práce. Druhou možností by mohla být varianta výměny základní desky Arduino Mega, za desku Uno a dále využití některého z dostupných GRBL kódů a GRBL řídicího softwaru. Avšak toto řešení by s sebou dále neslo jiná úskalí, z nichž největším by byla absence digitálních pinů na základové desce, neboť Arduino Uno obsahuje těchto pinů podstatně méně v porovnání s Arduinem Mega 2560. V následujících podkapitolách je zachycen postup práce při snaze o vyřešení řízení soustavy krokových motorů.

#### 8.4.1 Testování joysticku pro osy XYZ

Jako nejužitečnější varianta ovládání SMS se ukázalo řešení využívající dvou samostatných analogových joysticků fungujících na principu PS2. Každý z nich umožňuje ovládat 2 směry pomocí náklonné páčky. Dále joystick slouží jako samostatně programovatelné tlačítko. Jak lze vidět na Obr. 28 první z dvojice joysticků umožňuje ovládání os X a Y a druhý ovládání osy Z.

Správnost myšlenky a funkčnost zapojení bylo nutné nejprve otestovat. K tomuto testu byla využita soustava LED diod imitující souřadnicový systém stroje XYZ. Analogový rozsah joysticku se rovná přibližně hodnotě 1023. Pokud se joystick nalézá v klidové poloze, jeho analogová hodnota se rovná přibližně číslu 512. Pokud tedy joystickem pohneme na některou ze stran, dostaneme interval 512-0 nebo 512-1023, který plynule s náklonem páčky roste či klesá. Tyto hodnoty lze pomocí serial monitoru sledovat. Funkčnost joysticku zjistíme díky jednoduchým příkazům if a else, když při pohybu páčkou dojde k rozsvícení dané LED diody, např. pohybem vlevo dojde k rozsvícení levé LED diody atd. Veškeré změny hodnot polohy joysticku jsou krokově zapisovány v seriál monitoru se zpožděním např. 10ms.



Obr. 28: Zapojení Joysticků při testování řízení



### 8.4.2 Kódy pro řízení krokových motorů

Samostatné krokové motory by byly zcela nepotřebným elektronickým zařízením, pokud by k jejich vybuzení z klidového režimu nebyl vytvořen vhodný řídicí kód v programu Arduino. Tento program předá skrze další zařízení jednotlivým motorům signály, jakým směrem a jak rychle se mají otáčet. Vzhledem k tomu, že krokový motor je se základní deskou Arduino propojen za pomoci CNC shieldu a speciálního driveru, odpadá složité nastavování, připojování a definování vstupních a výstupních pinů v nepájivém poli, jak by tomu bylo nutno, pokud by sestava byla realizována bez použití CNC shieldu. V první fázi došlo k vytvoření dvou řídicích kódů reagujících na polohování joysticku. Po následném vyladění drobných nedostatků v prvních dvou kódech, byl vytvořen třetí, jenž byl kombinací dvou předchozích. V prvním řídicím kódu byly nadefinovány tři rychlosti krokování motoru, které byly měněny za pomoci stisknutí a uvolnění tlačítka joysticku. Druhou variantou bylo provázání polohy joysticku s časováním kroků motoru, čili v zásadě lze říci, že k čím většímu natočení joysticku v dané ose dojde, tím rychleji se hřídel motoru otáčí.

Varianta první - tři rychlostní stupně. V tomto kódu je nutné nejprve nadefinovat obsazení pinů CNC shieldu a driveru vůči základní desce Arduino Mega 2560, což lze vysledovat na Obr. 19. Detailní informace lze také nalézt přímo v technických listech CNC shieldu a driver DRV8825. V dalším kroku je nutné nastavit směr digitálních kroků na výstup a to zejména piny řídicí krokový motor – krok, směr, zapnutí.

Varianta druhá – nastavení rychlosti krokového motoru s ohledem na úhel natočení ovládacího joysticku. V této proporcionální variantě je stejně jako ve variantě jedna nutné v úvodu nadefinovat veškeré využívané piny na základní desce. Stejně tak nastavení směru digitálních pinů. Hlavní rozdíl nastává v části kódu, ve které dochází k definování podmínek - kdy a jak se má motor uvést v chod. V této variantě byla využita funkce s názvem map, jejíž hlavním úkolem je převést hodnoty rozsahů vycházející z analogového joysticku na rozsah využitý pro zpoždění mezi kroky motoru. Díky této funkci dojde posléze k zvyšování, či snižování otáček motoru v důsledku úhlu natočení analogového joysticku.

Při standardním testování funkčnosti se však tato varianta neshledala s počátečními očekáváními, jelikož rozlišení joysticku nebylo dostatečně citlivé, a

tudíž krokový motor nevykazoval dostatečně rychlé změny rychlostí otáček. Při manipulaci se SMS nezkušenou obsluhou by tedy mohlo dojít k poškození stroje, neboť by mohlo dojít k nekontrolovatelnému zrychlení pinoly a následné kolizi.

Z tohoto důvodu byla navržena varianta třetí, jež kombinuje předchozí dva návrhy. Obsluha má možnost stiskem tlačítka joysticku navolit rychlostní program, kterým se celá soustava bude pohybovat. Při jednom stisku a uvolnění tlačítka dojde k zapnutí rychlosti – mikroposuvu, při dalším stisku a uvolnění tlačítka dojde k přepnutí na běžnou polohovací rychlost. Po třetím stisku a uvolnění tlačítka dojde k přepnutí rychlosti polohování závislé na natočení analogového joysticku – viz druhá varianta. Tato možnost se jeví jako nejvhodnější, neboť se SMS může manipulovat i nezkušená obsluha. Ukázku části kódu varianty druhé lze vidět na Obr. 29, celý kód je přiložen v příloze č. 5.

```
//OSA X 15081933

if (aktX > 5) {
    aktX = map(aktX, 0, 1023-KlidX, 0, 100); // Přemapování souř. joysticku
    aktX_new = map(aktX, 0, 100, 15000, 2000); // Přemapování =>zpoždění
    digitalWrite(dir_pinX, HIGH); // (HIGH = po směru H.R.)
    digitalWrite(step_pinX, HIGH);
    digitalWrite(LED_XP, HIGH);
    delayMicroseconds(aktX_new);
    digitalWrite(step_pinX, LOW);
    delayMicroseconds(aktX_new);
}

else {
    digitalWrite(LED_XP, LOW);
}
```

*Obr. 29: Ukázka kódu v programu Arduino - rotace motoru pro osu X<sub>+</sub>*

## 8.5 Přípravné práce a výroba

Přípravné práce, které bylo nutné vykonat před samotnou montáží, tkvěly ve výrobě nových, či v úpravě stávajících součástí. Využívány byly zejména technologie soustružení, frézování, vrtání, ale i laserové pálení, či svařování a pájení.

Provedeny byly následující činnosti:

- Výpalky držáků motorů – držáky motorů pro osy XYZ byly vyrobeny z černé oceli EN 10131 za pomoci laserového pálicího CNC stroje na základě DXF podkladů.

Zatímco držáky pro osy X a Y byly jednokusové, držák pro osu Z bylo dále nutné svařit za pomoci svařovacího invertoru metodou TIG. Schéma výpalků pro osy XY a svařence pro osu Z lze vidět v kapitole 5.1. Detailní výkresy jsou přiloženy v příloze č. 1 a č. 2.

- Uchycení ozubených konečných řemenů osy XY – po demontáži stávajících plechových pásků bylo žádoucí ve všech třech osách namontovat nové ozubené PU konečné řemeny, včetně ozubených řemenic. Tyto řemeny musely být pevně zafixovány k pohyblivým částem stroje v osách XYZ. Z tohoto důvodu byly zkonstruovány upínky sloužící k fixaci řemenů na principu silového a tvarového spojení vyvozeného za pomoci šroubového spoje. Upínky se skládají ze dvou součástí tvořících svařenec a jednoho protikusu. Jejich výkresová dokumentace je přiložena v příloze č. 3.
- Uchycení ozubeného konečného řemene osy Z – stejně jako u os X a Y bylo i u osy Z nutné připevnit ozubený řemen k pohyblivé části stroje. Ideálním řešením se ukázalo využití současného protizávaží pinoly, na kterém byly následně provedeny drobné úpravy týkající se frézování drážek, vrtání děr a řezání závitů pro napínací šrouby. 3D model navrhovaných úprav lze vidět na Obr. 27. Výkresová dokumentace současného řešení je přiložena v příloze č. 4.
- Ozubené řemenice – veškeré ozubené řemenice dodané firmou Tyma byly opatřeny předvrtanou dírou či středícími důlky. Z tohoto důvodu bylo nutné veškeré řemenice přizpůsobit rozměrům stávajících hřídelů či ložisek dle jejich následného využití. Provedené práce se týkaly zejména sražení čelních ploch přírub některých řemenic, soustružení vnitřních děr, vrtání děr a řezání závitu pro upevňovací šrouby bez hlavy s vnitřním imbusem – tzv. „červ“.
- Pájení přívodních kabelů ke krokovým motorům – vzhledem k nedostatečné délce přívodních kabelů krokových motorů, bylo nutné v osách X a Z provést prodloužení stávajících vodičů. Toto prodloužení bylo realizováno za pomoci měkké pájky přidáním kabelových muzikusů. Díky této operaci byly motory dostatečně dlouhé pro polohování stroje v celém rozsahu všech tří os.

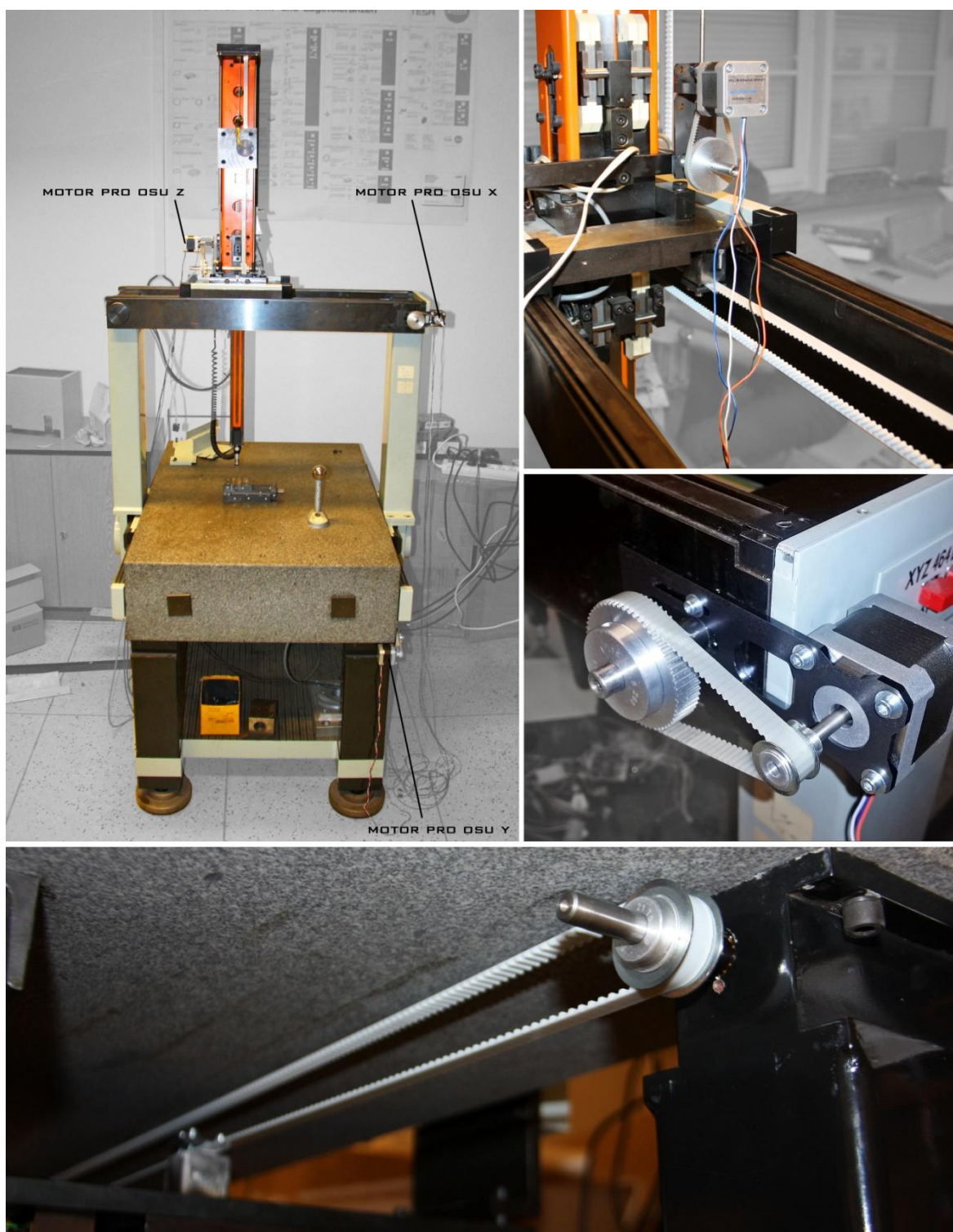
## 8.6 Montážní práce

Po vyhotovení veškerých přípravných prací bylo možné přistoupit k samotné montáži na SMS, který byl díky předchozím činnostem, týkajících se demontáže nepotřebných komponentů, plně připraven k osazení součástmi novými. Montáž nových komponentů, využitých pro stavbu pohonu - varianty A, na SMS byla provedena pouze za pomoci dostupných zdrojů KSA a vlastních nástrojů autora práce. Na montážních činnostech se podílel samotný autor práce s výpomocí Bc. Michala Štechy.

Níže jsou vypsány úkony, které byly provedeny v rámci montáže Varianty A.

- montáž ozubených kol na hřídele,
- osazení stroje hřídelem,
- montáž držáků motorů,
- montáž upínek řemenů,
- aplikace a napínání řemenů,
- montáž motorů,
- výsledná kontrola všech částí.

Na Obr. 30 lze vidět výsledek montážních prací a tedy kompletní zrealizování pohonu varianty A na SMS Somet Berox XYZ 464B.



*Obr. 30: Realizace pohonu SMS*

## 8.7 Kalibrace

Posledním krokem, který by bylo nutno provést v jakémkoliv z navrhovaných variant, je kalibrace a kompenzace celého SMS. Předpokladem pro správně provedenou kalibraci SMS je naprostá funkčnost mechaniky stroje, dotykové sondy, geometrie stroje, bezzávadnost ložisek atd.









Odborná firma s autorizací provádí kalibrace SMS dle norem ČSN ISO EN 10 360-2. Ještě před provedením kalibrace by bylo nutné provést úpravu korekční matice pro softwarovou korekci mechanických chyb stroje. Společnost Topmes využívá k těmto úkonům vlastní software sledující hodnoty proměření svazku měrek ve veškerých prostorových úhlopříčkách SMS. Výsledkem těchto prací je kalibrační list a opatření stroje kalibrační značkou. [30]

Interval kalibrace SMS byl zvolen na KSA každé tři roky. Tento mezník bude naplněn v roce 2017, avšak z důvodu dalších plánovaných prací na SMS bude posunut. K finálnímu kroku a tedy ke kalibrování SMS Somet Berox dojde tedy až po úplném dokončení veškerých prací.

Ačkoliv SMS s nově realizovaným pohonem funguje na první pohled bez problémů a pohyby všech tří os nejeví žádné známky odchylek od plynulosti chodu, opak může být pravdou. Při montážních pracích na SMS hrozilo riziko, že i přes dodržení veškerých zásad manipulace s citlivým metrologickým zařízením, dojde k narušení nebo vychýlení některé ze součástí, což by mělo za následek rozkalibrování celého zařízení. Rozkalibrované zařízení by mohlo vykazovat při budoucím měření známky nepřesností. V tomto případě by bylo nutné provedení kalibrace odbornou firmou. Kalibraci těchto, v podstatě historických, zařízení provádí již jen velmi málo firem. Cena kompletní kalibrace a kontroly se může vyšplhat i na několik desítek tisíc korun. Snadno by se tedy mohlo stát, že cena za kalibraci by se mohla vyrovnat reálné ceně tohoto stroje.

## 9 Kontrola funkčnosti a přesnosti stroje

S ohledem na finanční náklady bylo autorem práce provedeno testovací měření na inovovaném SMS, na kterém byly kontrolovány základní ocelové měrky – tzv. „Johansonky“. Tyto měrky jsou vyrobeny z vysoce kvalitní speciální oceli ve třídě přesnosti 1. Takové měrky lze využívat pro přesné měření při kalibraci a nastavení měřicích přístrojů. Část naměřených hodnot exportovaných ze softwaru Tango!3D lze vidět na Obr. 31. Kompletní zpráva je přiložena v příloze č. 7. (Vzhledem ke značnému stáří měrek a jejich lokálnímu znečištění lze očekávat mírné nepřesnosti při následném měření.)

	Actual	Nominal	Hi-Tol	Lo-Tol	Difference	Error	Graph
<b>Distance</b> Plane1,Plane2							mm, dec
 99.99	99.99	100.00	0.01	-0.01	-0.01		
<b>Distance</b> Plane5,Plane6							mm, dec
 79.99	79.99	80.00	0.01	-0.01	-0.01		
	Actual	Nominal	Hi-Tol	Lo-Tol	Difference	Error	Graph
<b>Distance</b> Plane4,Plane5							mm, dec
 80.01	80.01	80.00	0.01	-0.01	0.01		
<b>Distance</b> Planeyz,Plane3							mm, dec
 100.01	100.01	100.00	0.01	-0.01	0.01		

Obr. 31: Hodnoty naměřené na upraveném SMS

Jak lze vidět na Obr. 31, naměřené hodnoty na SMS, s nově realizovaným pohonem, nenesou žádné známky výrazných diferencí oproti nominálním hodnotám měřených součástí. Díky této provedené kontrole funkčnosti stroje lze konstatovat, že realizace pohonu Varianty A byla provedena úspěšně.

### 9.1 Podmínky pro úplné uvedení do provozu

V rámci této diplomové práce byla realizována přestavba stroje s ručním pohonem na pohon strojní za pomoci elektromotorů. Z tohoto důvodu je nutné před uvedením zařízení do provozu také zabezpečit, aby stroj splňoval normu ČSN EN 60204-1 ed. 2, která pojednává o bezpečnosti strojních zařízení. Dále provést revizi stroje a po kompletním dokončení modernizace uskutečnit kalibraci viz kapitola 8.7 včetně kompletního testu způsobilosti měřicího zařízení s testem opakovatelnosti.

# Závěr

Cílem této diplomové práce bylo navržení několika variant pohonu pro souřadnicový měřicí stroj Somet Berox XYZ 464B, jenž se nachází v laboratořích TUL FS na Katedře výrobních systémů a automatizace. Dle stanovených kritérií byla zvolena vhodnější varianta návrhu, která byla posléze realizována na SMS Somet Berox. V průběhu přípravných prací bylo nejprve nutné seznámit se s konstrukcí 30 let starého stroje z dílen tehdejší společnosti Somet. Na základě nově nabitých znalostí byly vyhotoveny dvě komplexní varianty systému pohonu pro souřadnicový měřicí stroj Somet Berox.

Varianta A je založena na principu řízení celé soustavy krokových motorů za pomoci platformy Arduino, do které byly připojeny další přídavné shieldy. Díky nim je možné všechny tři motory os XYZ řídit a ovládat speciálními analogovými joysticky, taktéž připojenými k platformě Arduino. V této variantě bylo dále počítáno s nahrazením stávajícího systému kladek, ocelových pásků, elektromagnetických spojek a původního mikroposuvu za převod realizovaný ozubenými řemeny řemenicemi.

Ve variantě B bylo navrženo využití kompletního řídicího systému od některého z renomovaných výrobců řídicích komponentů jako např. Renishaw, Pantec, nebo Deva. Přínosem by bylo plně profesionální řešení, které je využíváno u dnešních SMS. Tato varianta však byla zavrhnuta zejména pro velké finanční zatížení rozpočtu vyhrazenému na přestavbu stroje Somet Berox, tudíž byla vybrána k realizaci varianta A.

Celá realizace vybrané varianty probíhala od zaměření, konstrukčních návrhů držáků motorů, úchytů řemenů v programu Autodesk Inventor, jejich vypálení na CNC laseru, objednání veškerých potřebných komponent, demontáže stávajících nepotřebných součástí, přes vytvoření řídicího kódu, propojení veškeré elektroniky, kompletní přípravné práce a montáže nových komponent, až po závěrečné testování funkčnosti celé soustavy.

Výsledkem celého projektu se stal plně funkční, dále modifikovatelný, poloautomatický SMS poháněný krokovými elektromotory, řízenými platformou Arduino a ovládanými za pomoci manipulačních joysticků.



V závěru lze doporučit několik eventuálních budoucích úprav SMS Somet Berox XYZ 646B, které mohou vést k zefektivnění pracovních procesů na tomto stroji.

Jedná se zejména o úpravu řídicího kódu, aby bylo možné stroj využívat v plně automatizovaném režimu, jako je tomu u profesionálních SMS dnešní doby.

Další možnou úpravou je navržení jednoduchých spojek, díky kterým by bylo možné odpojit jednotlivé osy od elektromotorů. V případě poruchy některého z motorů bude tedy možné probíhající měření provádět za pomoci ručního polohování, jako tomu bylo doposud.

Poslední navrženou úpravou je propojení signálu z dotykové sondy s platformou Arduino. Tato úprava by přispěla velkou měrou zejména k ochraně citlivých komponentů SMS a celkovému zefektivnění měření. V okamžiku doteku rubínové kuličky a měřené součásti by došlo k automatickému zastavení polohování všech tří os, čímž by byl stroj chráněn proti nechtěnému nárazu, ať už v důsledku neopatrné manipulace, či technické závady.

V případě budoucí realizace některé z těchto navrhovaných úprav SMS Somet Berox dojde k dalšímu výraznému posunu v celkové modernizaci tohoto původně ručního SMS.

# Seznam literatury:

- [1] BOSCH, John A. *Coordinate measuring machines and systems*. New York: M. Dekker, c1995. ISBN 0824795814.
- [2] MILETÍN, Jiří. *Otázky p. Hadače*. Teplice, 2017. [nepublikovaný dokument]
- [3] MILETÍN, Jiří. *Interní informace TST k.p. Somet Teplice*.
- [4] JIŘÍ, Miletín, Dvořák MIROSLAV a Wais STANISLAV. *Pracovní stůl, zejména pro seřizování a měřicí přístroje s mosty uzavřených konstrukcí*. 1982-5711.
- [5] MILETÍN, Jiří, Lubomír TANZMANN a Wais STANISLAV. *Zařízení pro posuv a aretaci polohy pinoly, zejména pro souřadnicové měřicí stroje*. 273598 1988-7964. Uděleno 23.11.1990.
- [6] MILETÍN, Jiří a Stanislav WAIS. *Zařízení pro mikroposuv mostu, saní a pinoly, zejména pro seřizovací a měřicí stroje*. Uděleno 27.12.1989.
- [7] POKORNÝ, Přemysl. *Souřadnicové měřicí stroje*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 1998. ISBN 8070833262.
- [8] Průvodce technologií souřadnicového měřicího stroje. *Renishaw* [online]. [cit. 2017-04-29]. Dostupné z: <http://resources.renishaw.com/cs/details/kapesni-pruvodce-vysvetleni-snimacich-technologie-souradnicovych-mericich-stroju--18558>
- [9] VLČEK, Jan. Lineární optické snímače polohy. *Automa* [online]. 2006, **2006**(6) [cit. 2017-04-04]. Dostupné z: [http://automa.cz/cz/casopis-clanky/linearni-opticke-snimace-polohy-2006\\_05\\_31121\\_1673/](http://automa.cz/cz/casopis-clanky/linearni-opticke-snimace-polohy-2006_05_31121_1673/)
- [10] Řada snímačů. *Renishaw* [online]. [cit. 2017-04-04]. Dostupné z: <http://www.renishaw.cz/cs/rada-snimacu-rg2-rg4--37826>
- [11] Tango\_flyer\_inside. In: *Topmes* [online]. [cit. 2017-03-29]. Dostupné z: [http://www.topmes.cz/download/?filename=l7w9j1g4\\_files%2Ftango\\_flyer\\_insider.pdf&downloadName=Tango\\_flyer\\_inside](http://www.topmes.cz/download/?filename=l7w9j1g4_files%2Ftango_flyer_insider.pdf&downloadName=Tango_flyer_inside)
- [12] ZEISS. *Portálové měřicí stroje*. Germany, 2015. CZ\_60\_020\_166I.
- [13] GÄRTNER, Jan. *NÁVRH LINEÁRNÍHO OSCILAČNÍHO POHONU S VNĚJŠÍM BUZENÍM*. Brno, 2010. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ.
- [14] *Rotary to linear motor unrolled* [online]. In: . [cit. 2017-05-15]. Dostupné z: <https://www.h2wtech.com/Images/NewsArtPics/rotary-to-linear-motor-unrolled.jpg>
- [15] *Machine components* [online]. In: . [cit. 2017-05-15]. Dostupné z: [http://www.contour-method.manchester.ac.uk/CMM\\_img/Machine\\_components.png](http://www.contour-method.manchester.ac.uk/CMM_img/Machine_components.png)

- [16] *Interní informace Zeiss*. 2017.
- [17] PEŠÍK, Lubomír. *Části strojů: stručný přehled*. Vyd. 4., dopl. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2010. ISBN 978-80-7372-574-7.
- [18] Jak se řídí krokové motory? *STOMISI® / vývoj a výroba elektroniky* [online]. [cit. 2017-04-16]. Dostupné z: <http://www.stomisi.cz/jak-se-ridi-krokovye-motory>
- [19] KLOBOUČEK, Jan. *Snímače v průmyslu*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2012. ISBN 978-80-7372-828-1.
- [20] Co je Arduino. *Arduino.cz - Webový magazín o Arduinu a elektronice* [online]. [cit. 2017-03-31]. Dostupné z: <https://arduino.cz/co-je-to-arduino/>
- [21] BARRAGÁN, Hernando. *The Untold History of Arduino* [online]. [cit. 2017-03-31]. Dostupné z: <http://arduinohistory.github.io/>
- [22] Invention Story and History of Development of Arduino. *Electronic Circuits and Diagram-Electronics Projects and Design* [online]. 2014 [cit. 2017-04-29]. Dostupné z: <http://www.circuitstoday.com/story-and-history-of-development-of-arduino>
- [23] DRV8825 Stepper Motor Driver Carrier, High Current. *Pololu Robotics and Electronics* [online]. [cit. 2017-04-16]. Dostupné z: <https://www.pololu.com/product/2133>
- [24] Podporovaný Hardware. *Topmes* [online]. [cit. 2017-05-15]. Dostupné z: <http://www.topmes.cz/technologie/software/tango-3d/137-podporovany-hardware>
- [25] *Pantec Metrology* [online]. [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: <http://pantec-metrology.com/en/products/controller/3360>
- [26] UCC T3 PLUS and UCC S3 CMM controller installation guide. *Renishaw* [online]. United Kingdom [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <http://www.renishaw.com/en/spa3--23230>
- [27] *Deva Electronics - Automatic CMM Solution* [online]. [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: <http://www.deva.co.uk/products/cmm-system-pack>
- [28] Vícekriteriální rozhodování za jistoty. *Ekonomická fakulta JU* [online]. [cit. 2017-05-03]. Dostupné z: <http://www2.ef.jcu.cz/~jfrieb/tspp/data/teorie/Vicekritko.pdf>
- [29] Introduction to Design for (Cost Effective) Assembly and Manufacturing. *The George W. Woodruff School of Mechanical Engineering* [online]. [cit. 2017-05-15]. Dostupné z: <http://me.gatech.edu/files/capstone/L071ME4182DFA>
- [30] Měřicí stroje. *Topmes* [online]. [cit. 2017-04-29]. Dostupné z: <http://www.topmes.cz/sluzby/kalibrace/41-merici-stroje>

# Seznam příloh

Příloha č. 1 – Výkres – Držáky motoru – list 1	
Příloha č. 2 – Výkres – Držáky motoru – list 2	
Příloha č. 3 – Výkres – Upínka řemenů	
Příloha č. 4 – Výkres – Úprava konstrukce závaží	
Příloha č. 5 – Arduino kód pro řízení krokových motorů v ose XYZ	
Příloha č. 6 – Grafické schéma zapojení soustavy varianty A	
Příloha č. 7 – Zpráva o měření v ose X a Y	
Příloha č. 8 – Realizace pohonu – osa X	
Příloha č. 9 – Realizace pohonu – osa Y	
Příloha č. 10 – Realizace pohonu – osa Z	
Příloha č. 11 – Fotografie výsledku realizace	

# Seznam obrázků

Obr. 1: Základní části SMS Somet Berox .....	14
Obr. 2: Detail soustavy mikroposuvu .....	17
Obr. 3: Doteková sonda Renishaw PH6 .....	18
Obr. 4: Rozhraní softwaru Tango!3D .....	20
Obr. 5: Vývoj SMS .....	21
Obr. 6: Podobnost rotačního a lineárního elektromotoru .....	22
Obr. 7: Ukázka přenosu tepla SMS .....	24
Obr. 8: Schéma soustavy - Varianta A01 .....	26
Obr. 9: Schéma soustavy - Varianta A02 .....	27
Obr. 10: Náčrt držáku motoru pro osu X .....	29
Obr. 11: Náčrt držáku motoru pro osu Y .....	29
Obr. 12: Náčrt držáku motoru pro osu Z .....	29
Obr. 13: Geometrie řemenového převodu s tvarovou vazbou .....	31
Obr. 14: Sestava pohonu v ose X .....	32
Obr. 15: Sestava pohonu v ose Y .....	34
Obr. 16: Sestava pohonu v ose Z .....	35
Obr. 17: Indukční snímač polohy .....	37

Obr. 18: Rozložení pinů na desce Arduino Mega 2560 .....	39
Obr. 19: Rozložení pinů na 3D CNC Shieldu pro Arduino .....	40
Obr. 20: Rozložení pinů na driveru DRV8825 .....	41
Obr. 21: Arduino Joystick PS2 a jeho mapování souřadnic .....	42
Obr. 22: Studie kontroleru .....	44
Obr. 23: Sestava Pantec Eagle basic .....	46
Obr. 24: Měřicí sestava od společnosti Renishaw .....	47
Obr. 25: Ukázka Deva karty .....	47
Obr. 26: Držák motoru osy Z s prolnutím DFA .....	53
Obr. 27: Návrh úpravy součásti pro napínání řemene v ose Z .....	53
Obr. 28: Zapojení Joysticků při testování řízení .....	56
Obr. 29: Ukázka kódu v programu Arduino - rotace motoru pro osu X <sub>+</sub> .....	58
Obr. 30: Realizace pohonu SMS .....	61
Obr. 31: Hodnoty naměřené na upraveném SMS .....	63

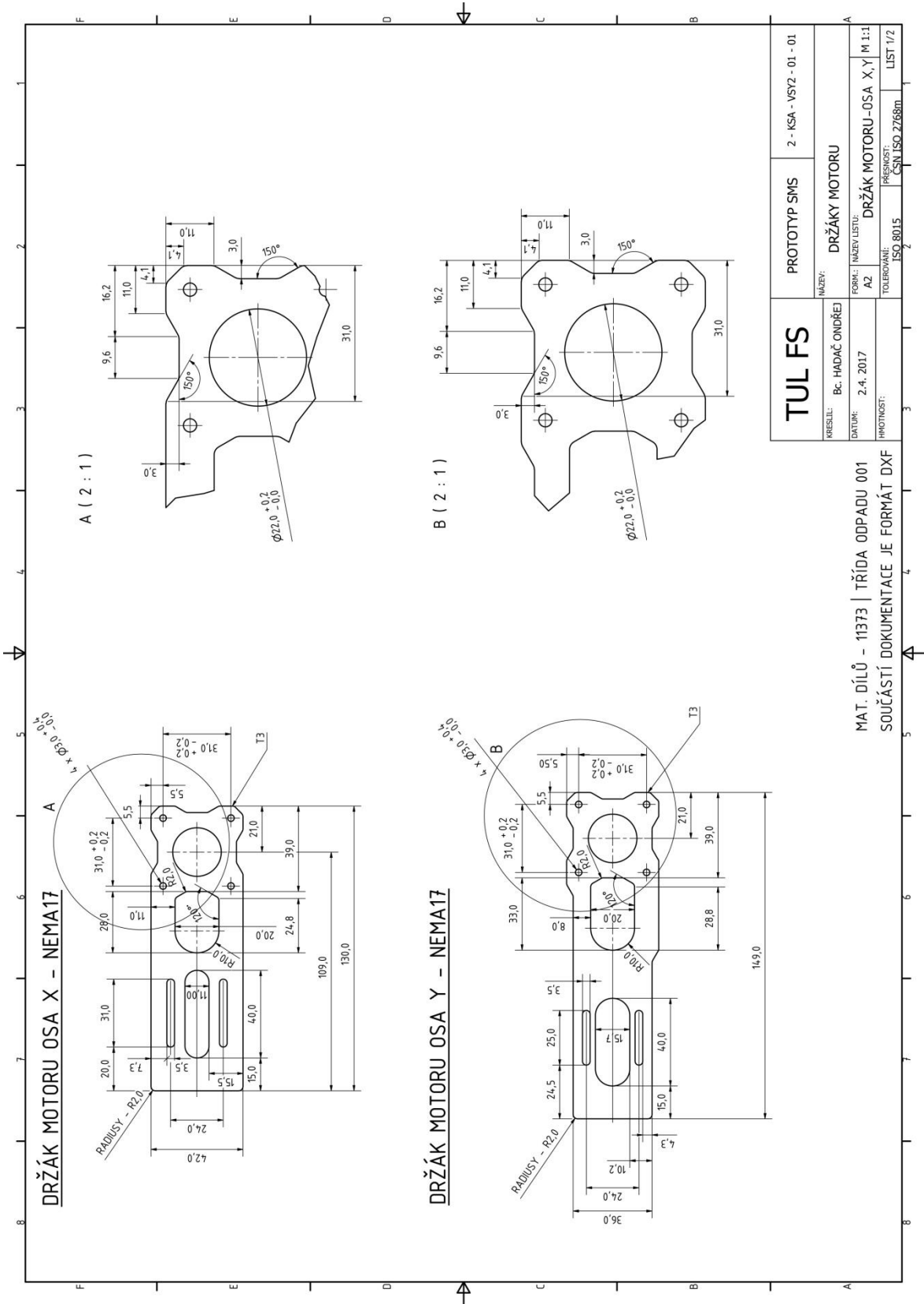
## Seznam tabulek

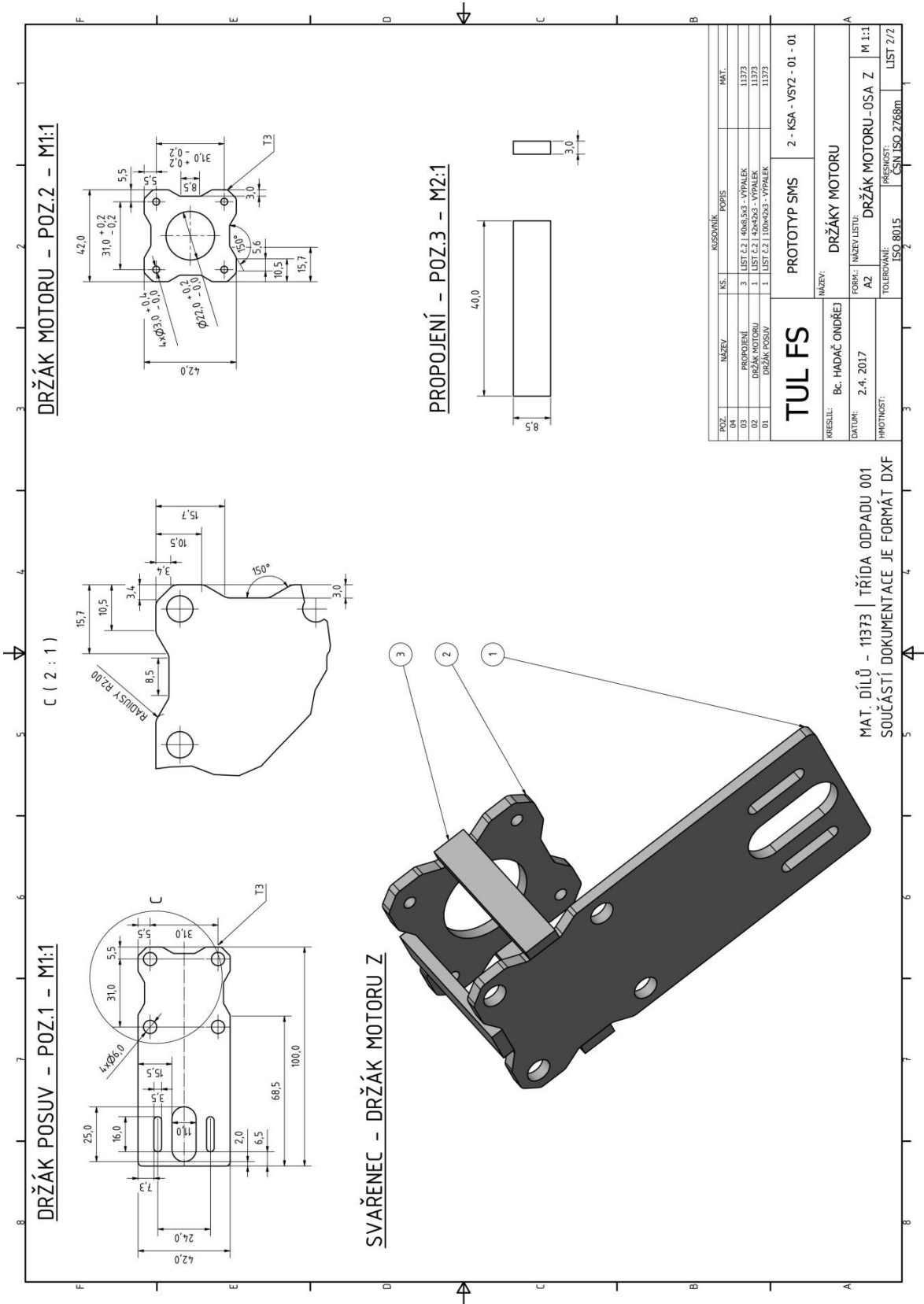
Tabulka 1: Mikrokování driveru DRV8825 .....	41
Tabulka 2: Bodové ohodnocení .....	50
Tabulka 3: Metoda pořadí .....	50
Tabulka 4: Harmonogram prací .....	51
Tabulka 5: Soupis finančních nákladů .....	54

## Seznam grafů

Graf 1: Časová osa plánovaných prací .....	51
--	----

Příloha č. 1





**Technical Drawing Details:**

- Section A-A (1:1):** Shows a cross-section of the part with dimensions: 8,0, 5,0, 4,0, 2,0, 3,0, 60,0, 15,0, 30,0, 35,0, 43,0. It includes a hole specification  $4 \times \varnothing 3,2 - M4$ .
- Top View:** Shows a rectangular part with rounded corners (R30,0) and dimensions: 6,0, 7,0, 52,0 (+0,1/-0,1), 30,0, 40,0, 5,0. It includes a hole specification  $2 \times \varnothing 5,5$ .
- Side View:** Shows a profile with dimensions: 10,1, 5,0, 10,0, 3,0.
- Isometric View:** Shows the 3D shape of the part with callouts 1, 2, and 3.
- BOM Table:**

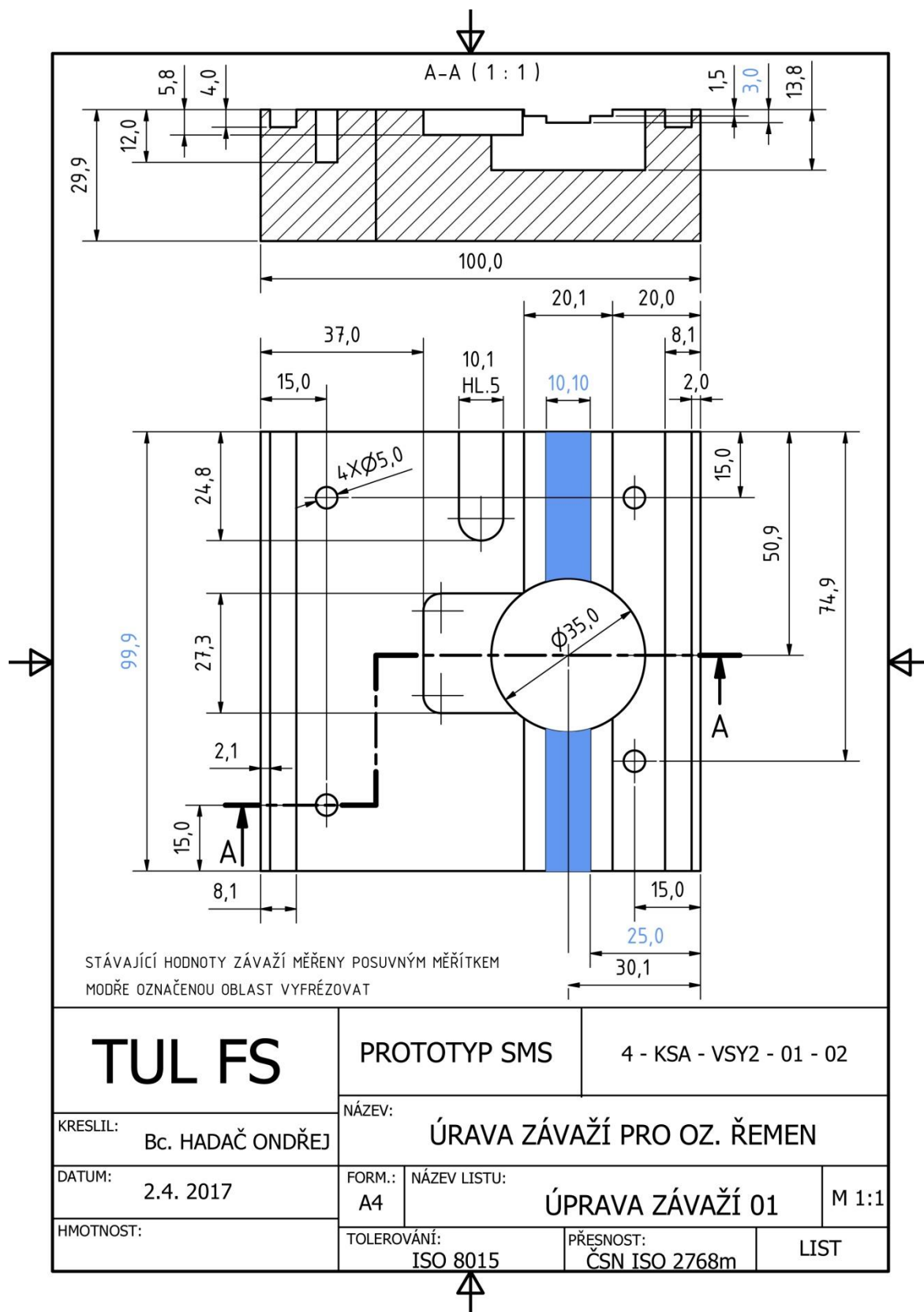
KUSOVNÍK				
POZ.	NÁZEV	KS.	POPIS	MAT.
04				
03	PROTIKUS	1	VÝPALEK - 30x30x5	11373
02	TR.4 HR.+ ČELO T3	1	30x30x3x32	11373
01	UPÍNKA	1	VÝPALEK 60x40x3	11373

**Metadata:**

- MAT. DÍLŮ - 11373 | TŘÍDA ODPADU 001
- SOUČÁSTÍ DOKUMENTACE JE FORMÁT DXF
- TUL FS**
- PROTOTYP SMS**
- 4 - KSA - VSY2 - 01 - 03**
- KRESLIL: Bc. HADAČ ONDŘEJ
- NÁZEV: UPÍNKA ŘEMENE - X,Y
- DATUM: 2.4. 2017
- FORM.: A4
- NÁZEV LISTU: UPÍNKA ŘEMENE
- M 1:1
- HMOTNOST:
- TOLEROVÁNÍ: ISO 8015
- PŘESNOST: ČSN ISO 2768m
- LIST 1



# Příloha č. 4



## Příloha č. 5

```
//DEFINICE PINŮ MOTORU

#define step_pinX 2 // krok X pin 2
#define dir_pinX 5 // směr X pin 5
#define step_pinY 3 // krok Y pin 3
#define dir_pinY 6 // směr Y pin 6
#define step_pinZ 4 // krok Z pin 4
#define dir_pinZ 7 // směr Z pin 7

#define EN 8 // zapnutí pin 8

//DEFINICE PINŮ JOYSTICKU

#define osa_X A10 // Osa X
#define osa_Y A11 // Osa Y
#define osa_Z A12 // Osa Z

#define button 50 // tlacitko

//DEFINICE PINŮ LED
#define LED_XL 27
#define LED_XP 26
#define LED_YH 25
#define LED_YD 24
#define LED_Z 22

int KlidX, KlidY, KlidZ;
int hodnota_X =0;
int hodnota_Y =0;
int hodnota_Z =0;

int aktX_new =0;
int aktY_new =0;
int aktZ_new =0;

void setup() {

    //MOTOR
    pinMode(dir_pinX, OUTPUT);
    pinMode(step_pinX, OUTPUT);

    pinMode(dir_pinY, OUTPUT);
    pinMode(step_pinY, OUTPUT);

    pinMode(dir_pinZ, OUTPUT);
    pinMode(step_pinZ, OUTPUT);

    pinMode(EN, OUTPUT);

    //LED
    pinMode(LED_XL, OUTPUT); // Nastavení výstupu
    pinMode(LED_XP, OUTPUT); // Nastavení výstupu
    pinMode(LED_YH, OUTPUT); // Nastavení výstupu
    pinMode(LED_YD, OUTPUT); // Nastavení výstupu
    pinMode(LED_Z, OUTPUT); // Nastavení výstupu

    KlidX = analogRead(osa_X);
    KlidY = analogRead(osa_Y);
    KlidZ = analogRead(osa_Z);

    pinMode(button, INPUT_PULLUP);

    digitalWrite(EN, LOW);
    delay(10);
    //Serial.begin(9600);
}

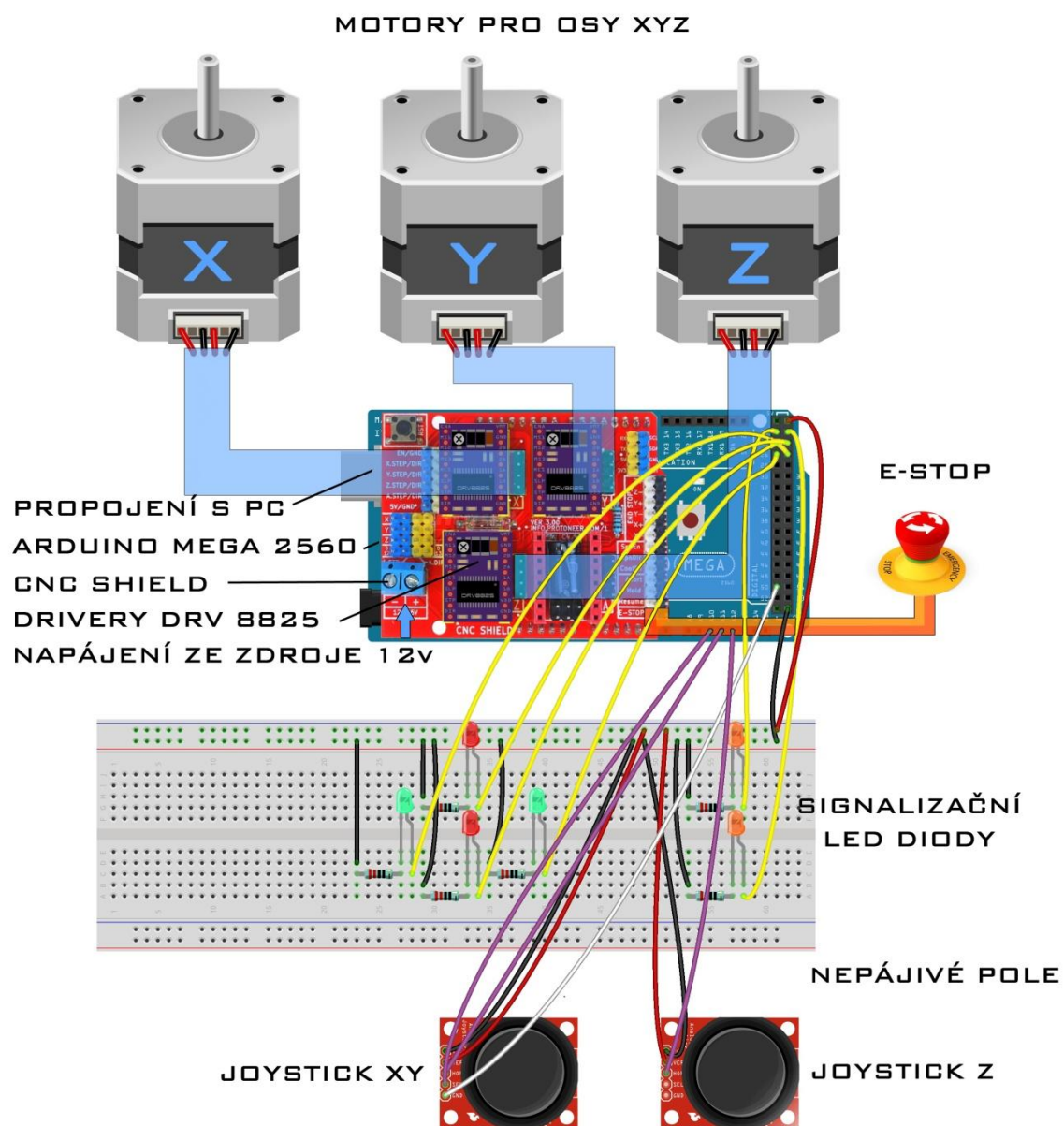
void loop() {

    int aktX, aktY, aktZ;

    aktX = analogRead(osa_X) - KlidX;
    aktY = analogRead(osa_Y) - KlidY;
    aktZ = analogRead(osa_Z) - KlidZ;

    //OSA X
    if (aktX > 5) {
        aktX_new = map(aktX, 0, 1023-KlidX, 0, 100);
        aktX_new = map(aktX, 0, 100, 15000, 1000);
        digitalWrite(dir_pinX, HIGH);
        digitalWrite(step_pinX, HIGH);
        digitalWrite(LED_XP, HIGH);
        delayMicroseconds(aktX_new);
        digitalWrite(step_pinX, LOW);
        delayMicroseconds(aktX_new);
    }
    else {
        digitalWrite(LED_XP, LOW);
    }
    if (aktX < -5) {
        aktX = map(aktX, 0, -KlidX, 0, -100);
        aktX_new = map(aktX, 0, -100, 15000, 1000);
        digitalWrite(dir_pinX, LOW); // (HIGH = po směru hod. ručiček / LOW = proti směru hod. ručiček)
        digitalWrite(step_pinX, HIGH);
        digitalWrite(LED_XL, HIGH);
        delayMicroseconds(aktX_new);
        digitalWrite(step_pinX, LOW);
        delayMicroseconds(aktX_new);
    }
    //OSA Y
    if (aktY > 5) {
        aktY = map(aktY, 0, 1023-KlidY, 0, 100);
        aktY_new = map(aktY, 0, 100, 15000, 1000);
        digitalWrite(dir_pinY, HIGH); // (HIGH = po směru hod. ručiček / LOW = proti směru hod. ručiček)
        digitalWrite(step_pinY, HIGH);
        digitalWrite(LED_YH, HIGH);
        delayMicroseconds(aktY_new);
        digitalWrite(step_pinY, LOW);
        delayMicroseconds(aktY_new);
    }
    else {
        digitalWrite(LED_YH, LOW);
    }
    if (aktY < -5) {
        aktY = map(aktY, 0, -KlidY, 0, -100);
        aktY_new = map(aktY, 0, -100, 15000, 1000);
        digitalWrite(dir_pinY, LOW); // (HIGH = po směru hod. ručiček / LOW = proti směru hod. ručiček)
        digitalWrite(step_pinY, HIGH);
        digitalWrite(LED_YD, HIGH);
        delayMicroseconds(aktY_new);
        digitalWrite(step_pinY, LOW);
        delayMicroseconds(aktY_new);
    }
    else {
        digitalWrite(LED_YD, LOW);
    }
    //OSA Z
    if (aktZ > 5) {
        aktZ = map(aktZ, 0, 1023-KlidZ, 0, 100);
        aktZ_new = map(aktZ, 0, 100, 15000, 1000);
        digitalWrite(dir_pinZ, HIGH); // (HIGH = po směru hod. ručiček / LOW = proti směru hod. ručiček)
        digitalWrite(step_pinZ, HIGH);
        digitalWrite(LED_Z, HIGH);
        delayMicroseconds(aktZ_new);
        digitalWrite(step_pinZ, LOW);
        delayMicroseconds(aktZ_new);
    }
    else {
        digitalWrite(LED_Z, LOW);
    }
    if (aktZ < -5) {
        aktZ = map(aktZ, 0, -KlidZ, 0, -100);
        aktZ_new = map(aktZ, 0, -100, 15000, 1000);
        digitalWrite(dir_pinZ, LOW); // (HIGH = po směru hod. ručiček / LOW = proti směru hod. ručiček)
        digitalWrite(step_pinZ, HIGH);
        digitalWrite(LED_Z, HIGH);
        delayMicroseconds(aktZ_new);
        digitalWrite(step_pinZ, LOW);
        delayMicroseconds(aktZ_new);
    }
    else {
        digitalWrite(LED_Z, LOW);
    }
    //Serial.print("OsaX ");
    //Serial.print(" ");
    //Serial.print(aktX);
    //Serial.print(" ");
    //Serial.print("OsaY");
    //Serial.print(" ");
    //Serial.println(aktY);
    //Serial.print(" ");
    //Serial.print("OsaZ");
    //Serial.print(" ");
    //Serial.println(aktZ);
    //delay(100);
}
```

## Příloha č. 6



## Příloha č. 7

### Component inspection report



Name : noname4 Date : 17.5.2017 10:36:32

Součást

	Actual	Nominal	Hi-Tol	Lo-Tol	Difference	Error	Graph
<b>Distance</b> Plane4,Plane5 $\bar{x}_i$	80.01	80.00	0.01	-0.01	0.01		mm, dec
<b>Distance</b> Planeyz,Plane3 $\bar{x}_i$	100.01	100.00	0.01	-0.01	0.01		mm, dec
<b>Distance</b> Plane6,Plane7 $\bar{x}_i$	60.02	60.00	0.01	-0.01	0.02	0.01	mm, dec
<b>Distance</b> Plane8,Plane9 $\bar{x}_i$	39.99	40.00	0.01	-0.01	-0.01		mm, dec
<b>Distance</b> Plane10,Plane11 $\bar{x}_i$	20.02	20.00	0.01	-0.01	0.02	0.01	mm, dec

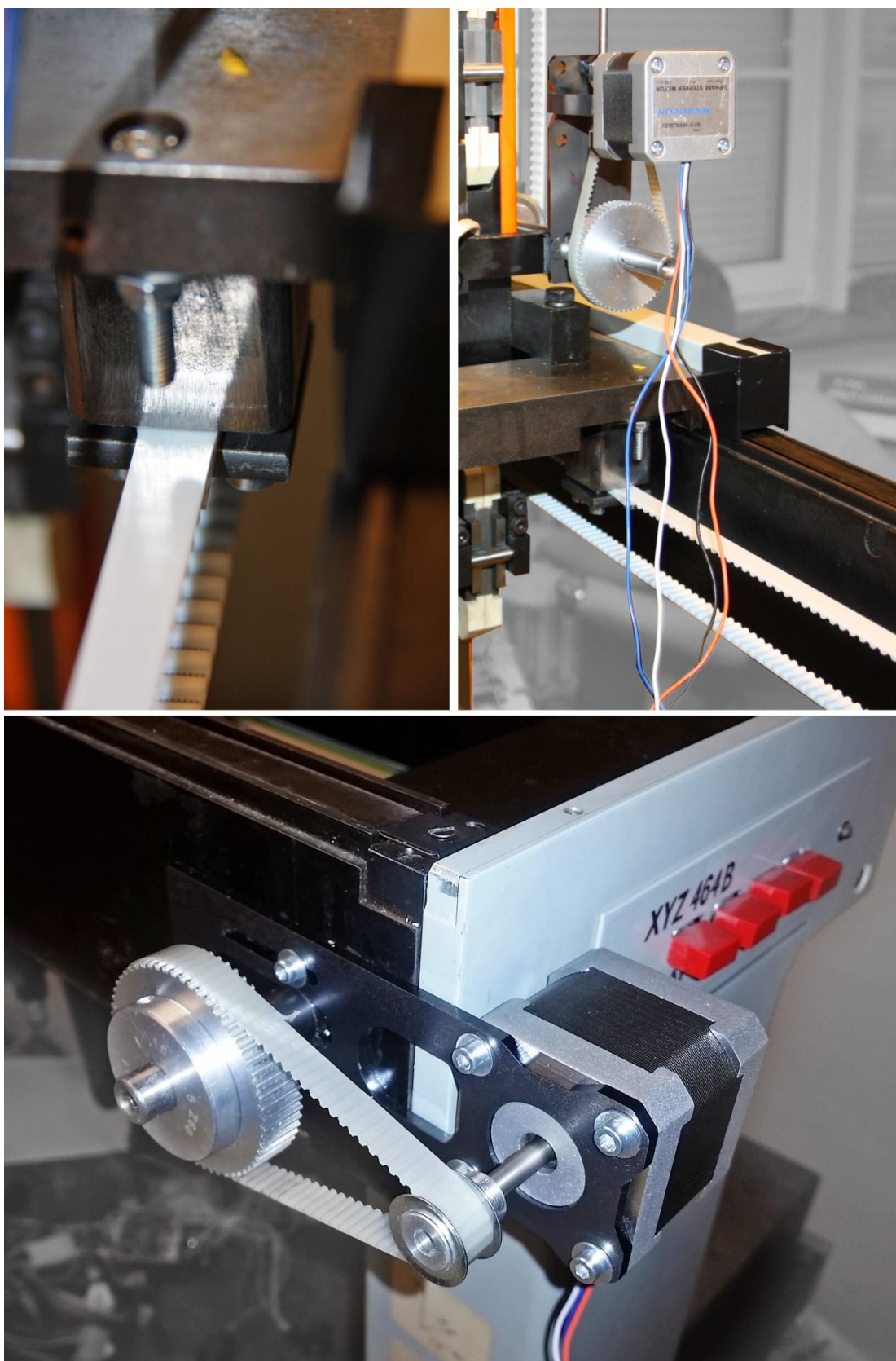
Name : noname1 Date : 17.5.2017 11:02:21

Součást 2

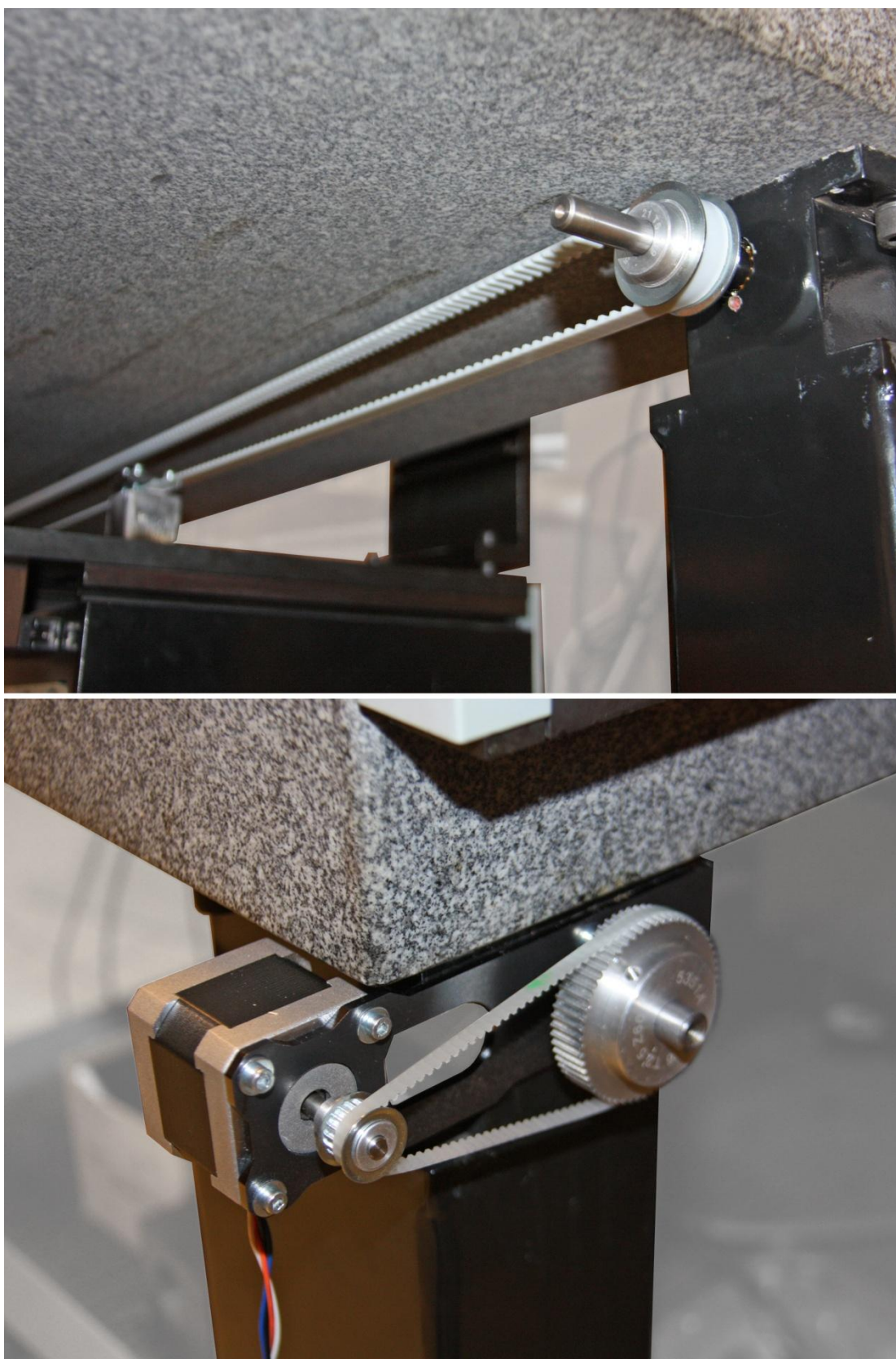
	Actual	Nominal	Hi-Tol	Lo-Tol	Difference	Error	Graph
<b>Distance</b> Plane1,Plane2 $\bar{y}_i$	99.99	100.00	0.01	-0.01	-0.01		mm, dec
<b>Distance</b> Plane5,Plane6 $\bar{y}_i$	79.99	80.00	0.01	-0.01	-0.01		mm, dec
<b>Distance</b> Plane9,Plane10 $\bar{y}_i$	60.02	60.00	0.01	-0.01	0.02	0.01	mm, dec
<b>Distance</b> Plane11,Plane12 $\bar{y}_i$	39.99	40.00	0.01	-0.01	-0.01		mm, dec
<b>Distance</b> Plane13,Plane14 $\bar{y}_i$	20.02	20.00	0.01	-0.01	0.02	0.01	mm, dec



## Příloha č. 8

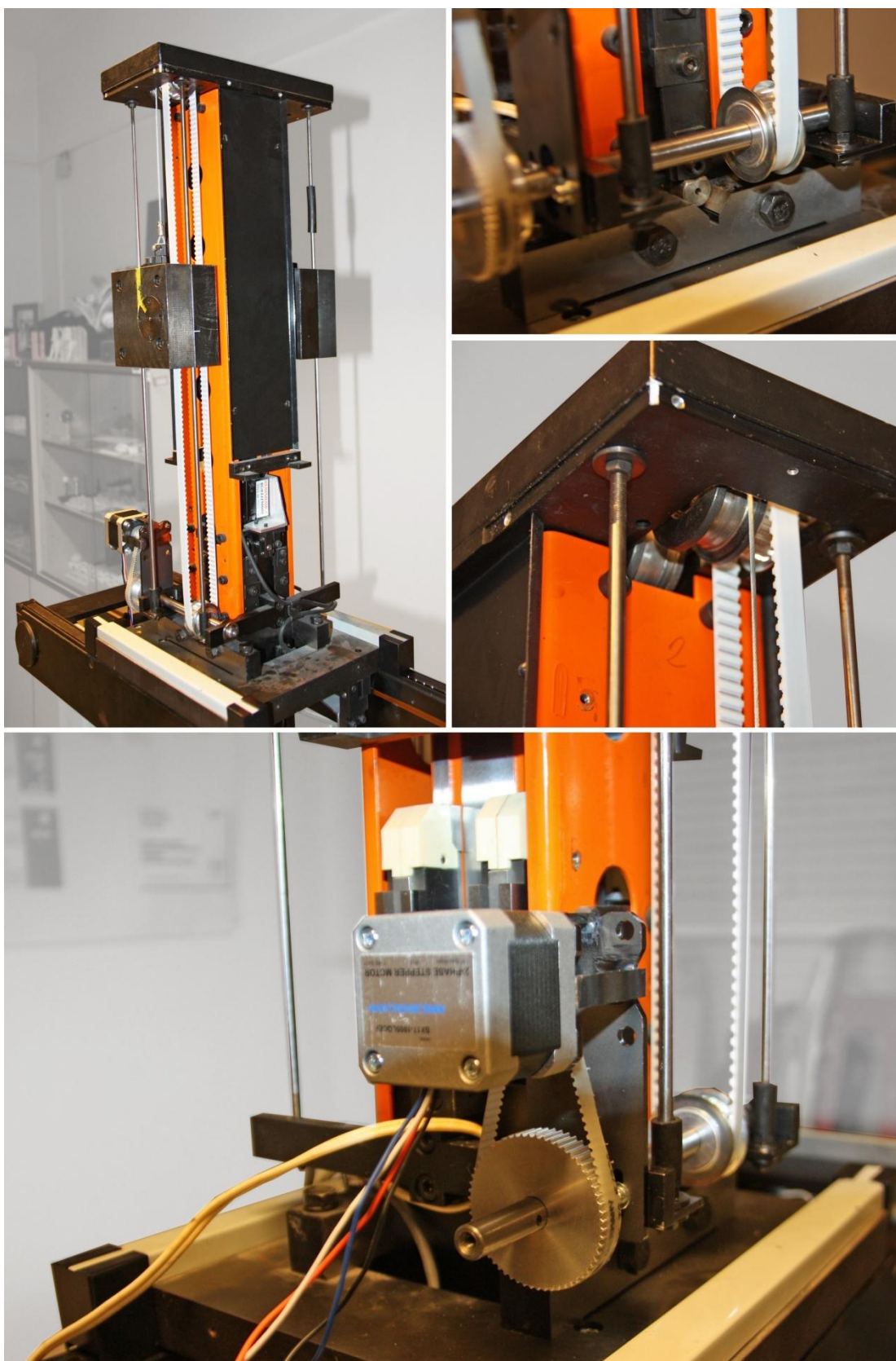


## Příloha č. 9





## Příloha č. 10



## Příloha č. 11

